

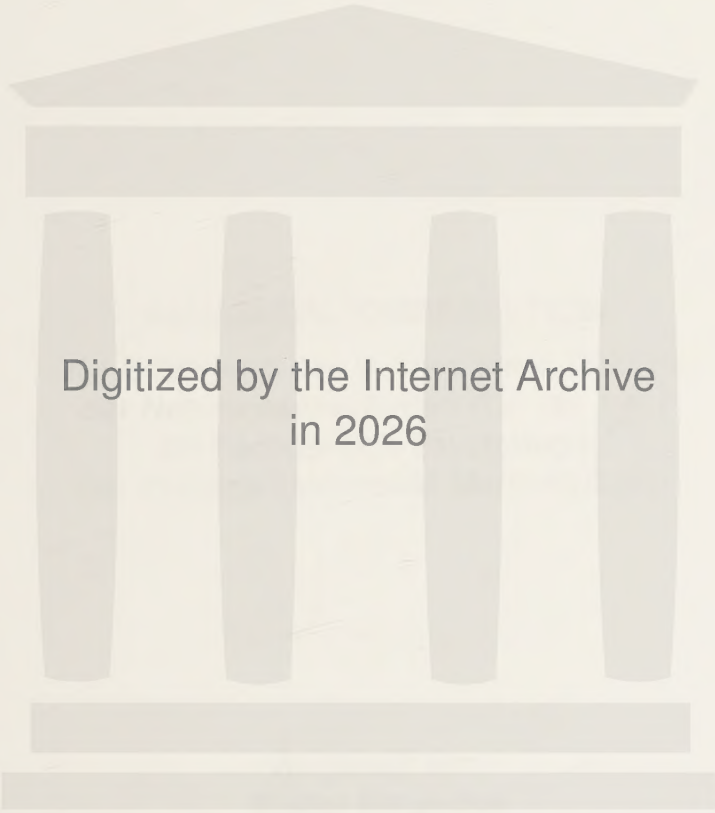
**Sensomotorisches Lernen beim Nachführen kontinuierlicher
Signale in einer Folgetrackaufgabe**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
am Fachbereich Psychologie
der Philipps-Universität Marburg /Lahn

Vorgelegt von
Walter Fingerhut
aus Bad Wildungen

Marburg /Lahn 1978



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551902_0058

**Sensomotorisches Lernen beim Nachführen kontinuierlicher
Signale in einer Folgetrackinaufgabe**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
am Fachbereich Psychologie
der Philipps-Universität Marburg /Lahn

Vorgelegt von
Walter Fingerhut
aus Bad Wildungen

Marburg /Lahn 1978

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Philipps-
Universität Marburg/Lahn als

Dissertation angenommen am 17. 11. 1978

Tag der mündlichen Prüfung am 15. 12. 1978

Berichterstatter: Prof. Dr. F. Merz

Mitberichterstatter: Prof. Dr. K. Th. Kalveram



VORWORT

Die Untersuchung sensomotorischer Prozesse wird am Psychologischen Institut bzw. Fachbereich Psychologie der Universität Marburg seit längerer Zeit betrieben, in erster Linie von den Professoren MERZ und KALVERAM. Ich wurde im Jahr 1972 als Mitarbeiter zur Durchführung eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützten Forschungsprojektes eingestellt, das von den genannten Personen unter Mitwirkung von D. ALBERT geplant worden war. Die Entwicklung der konkreten Fragestellung und der experimentellen Technik erfolgte in ausführlichen Diskussionen dieser Vierergruppe und wurde von mir realisiert. Es ist kaum möglich, die Beiträge einzelner Personen aufzuschlüsseln. Ich möchte jedoch Professor KALVERAM an dieser Stelle besonders erwähnen, weil ohne seine Unterstützung die technisch aufwendige Versuchsanordnung nicht zustande gekommen wäre.

Die wesentlichen Fragestellungen der vorliegenden Arbeit ergaben sich aus den Erfahrungen im Rahmen dieser Untersuchung, deren wesentliche Ergebnisse im zweiten Kapitel dargestellt werden. Mein originärer Beitrag zu der daran anschließenden, im dritten Kapitel dargestellten, Untersuchung besteht in erster Linie aus der Einführung von Belastungen des Lernprozesses durch eine Nebentätigkeit.

Neben Professor KALVERAM möchte ich an dieser Stelle einigen weiteren Personen danken, die auf verschiedene Weise an den Untersuchungen mitwirkten: Frau KALK und Frau SCHULTZE-NAUMBURG übernahmen Teile der Versuchsdurchführung bei der ersten Untersuchung, Herr HUBER und Herr GERHARDS führten die Versuche der zweiten Untersuchung durch. Herr HEUER erstellte die Apparatur der zweiten Untersuchung und brachte dabei eine Reihe von eigenen Ideen mit ein (vgl. Abschnitt 1.5).

Vor allem möchte ich auch dem Anleiter dieser Arbeit, Professor MERZ, danken, der mir weitgehende Freiheit ließ, aber stets gesprächsbereit war und viele wertvolle Anregungen gab.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>GEGENSTAND DER ARBEIT</u>	1
1.1 <u>Sensomotorisches Lernen und Fertigkeit</u>	1
1.1.1 Begriffsklärungen	2
1.1.2 Historischer Überblick	4
1.1.3 Kybernetische Betrachtungsweise: Mensch-Maschine System	8
1.1.4 Komponenten sensomotorischer Fertigkeiten	12
1.1.5 Stand der Theorienbildung	19
1.1.6 Zusammenfassung	24
1.2 <u>Tracking als Untersuchungstechnik</u>	25
1.2.1 Charakterisierung von Trackingaufgaben	26
1.2.2 Unabhängige Variablen	27
1.2.3 Abhängige Variablen	32
1.2.4 Zusammenfassung	35
1.3 <u>Lernen bei Trackingaufgaben</u>	36
1.3.1 Veränderung der Schwierigkeit	37
1.3.2 Nebentätigkeiten	38
1.3.3 Ausblenden der Rückmeldung	40
1.3.4 Zusammenfassung	42
1.4 <u>Zusammenfassung und Fragestellungen der Arbeit</u>	43
1.5 <u>Vorbemerkungen zu den experimentellen Untersuchungen</u>	45
2. <u>ERSTE UNTERSUCHUNG</u>	47
2.1 Methode	47
2.1.1 Trackinganordnung	47
2.1.2 Versuchsaufbau	48
2.1.3 Datenaufzeichnung und Auswertung	50

2.2	<u>Ergebnisse</u>	51
2.2.1	Korrelationen	52
2.2.1.1	Proportional-Transformation	52
2.2.1.2	Proportional-Integral-Transformation PI 0,5	54
2.2.1.3	Proportional-Integral-Transformation PI 0,8	54
2.2.1.4	Integral-Transformation	54
2.2.2	Zeitverschiebungen	57
2.2.2.1	Zeitverschiebungen mit Rückmeldung	57
2.2.2.2	Zeitverschiebungen ohne Rückmeldung	59
2.2.3	Zusammenfassung	61
2.3	<u>Diskussion</u>	62
3.	<u>ZWEITE UNTERSUCHUNG</u>	64
3.1	<u>Methode</u>	64
3.1.1	Trackinganordnung	64
3.1.2	Nebentätigkeit (Wahlreaktionsaufgabe)	66
3.1.3	Überprüfung des Lernverlaufs durch Ausschalten der Rückmeldung	67
3.1.4	Struktur des Versuchsaufbaus	67
3.1.5	Datenregistrierung	71
3.1.6	Zusammenfassung	72
3.2	<u>Auswertung</u>	73
3.2.1	Fehlermaße	73
3.2.2	Kreuzkorrelationen	75
3.2.3	Nebentätigkeit	76
3.2.4	Zusammenfassung	76
3.3.	<u>Ergebnisse</u>	77
3.3.1	Vergleich der Gruppenmittelwerte	79
3.3.1.1	Fehler	80
3.3.1.2	Korrelationen	87
3.3.1.3	Zusammenfassung und Interpretation	90
3.3.2	Vergleich der individuellen Mittelwerte innerhalb der Gruppen	92
3.3.2.1	Fehler	92
3.3.2.2	Korrelationen	99
3.3.2.3	Zusammenfassung	104

3.3.3	Vergleich des Leistungsverlaufes über die Perioden	104
3.3.3.1	Fehler	106
3.3.3.2	Korrelationen	110
3.3.3.3	Zusammenfassung	115
3.3.4	Vergleich ausgewählter Durchgänge	115
3.3.4.1	Kontrollgruppe	116
3.3.4.2	Experimentalgruppe 1	120
3.3.4.3	Experimentalgruppe 2	124
3.3.4.4	Zusammenfassung	129
3.4	<u>Diskussion</u>	134
3.4.1	Überblick	134
3.4.2	Stellungnahme zu den Fragestellungen	137
3.4.3	Praktische Folgerungen	141
4.	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	143
5.	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	147

1. GEGENSTAND DER ARBEIT

Ein Fahrschüler, der die ersten praktischen Fahrversuche unternimmt, führt jede einzelne Bewegung beim Schalten, Bremsen, Lenken usw. getrennt aus. Während er schaltet, kann er zum Beispiel nicht gleichzeitig den Blinker betätigen oder hupen. Die vielfältigen Bewegungsabläufe erfordern jeder für sich "die volle Aufmerksamkeit", ein Nebeneinander ist daher nicht oder kaum möglich.

Ein geübter Autofahrer kann demgegenüber gleichzeitig mit einem Fuß bremsen, mit dem anderen die Kupplung treten, mit der einen Hand den Blinker betätigen, mit der anderen zum Schaltheben greifen, dabei mit dem Beifahrer sprechen und sehen, daß eine bekannte Person über die Straße geht. Da die menschliche Informationsverarbeitungskapazität begrenzt ist, ist eine solche Leistung nur möglich, wenn die einzelnen motorischen Abläufe ohne wesentliche Zuwendung der Aufmerksamkeit ablaufen können. Dieser Zustand wird, nicht nur beim Autofahren, durch einen Lernprozeß erreicht.

Wie verläuft ein solcher Lernprozeß? Erst in letzter Zeit gibt es einzelne Ansätze, nach den Prozessen zu fragen, die einem Erwerb von sensomotorischen Fertigkeiten zugrundeliegen. Die vorliegende Arbeit stellt einen Schritt in diese Richtung dar. Sie beschäftigt sich mit der Frage, welche Prozesse in einem Individuum ablaufen, das eine relativ neue, in dieser Form noch nicht oder nur teilweise im Verhaltensrepertoire enthaltene, sensomotorische Fertigkeit erwirbt.

1.1. Sensomotorisches Lernen und Fertigkeit

Viele Autoren vertreten die Auffassung, daß sensomotorisches Verhalten im wesentlichen während der frühen Kindheit erlernt wird (z.B. FITTS & POSNER, 1973, 19). Später erforderliche neue sensomotorische Koordinationen bauen auf diesen Grundlagen auf,

sie werden aus bereits im Verhaltensrepertoire vorhandenen Elementen zusammengesetzt oder stellen eine Spezialisierung und Verfeinerung dar. Sensomotorisches Lernen besteht also in erster Linie darin, die vorhandenen sensomotorischen Elemente so zu kombinieren oder den neuen Anforderungen anzupassen, daß eine neue Einheit sensomotorischer Leistungsfähigkeit entsteht, eine Fertigkeit.

Zum besseren Verständnis der folgenden Darstellungen werden die beiden zentralen Begriffe, Fertigkeit und sensomotorisches Lernen, kurz erläutert und abgegrenzt.

1.1.1. Begriffsklärungen

Sensomotorisches Lernen ist ein Prozeß, der - wie im eingangs erwähnten Beispiel des Autofahrens - zum Beherrschen der Aufgabe führt. Dieser Zustand wird als Fertigkeit ("skill" im angloamerikanischen Sprachgebrauch) bezeichnet. Wodurch sich eine Fertigkeit auszeichnet, wird auf unterschiedliche Weise beschrieben oder definiert. Da diese Uneinheitlichkeit bezeichnend für den Stand der Erforschung sensomotorischer Fertigkeiten ist (vgl. die folgenden Abschnitte), sollen einige dieser Definitionen vorgestellt werden:

- (1) "The term skill denotes that some learning has taken place and that a smoothing or an integration of behavior has resulted. Extraneous movements have been omitted, and the performance is executed with increasing speed, and accuracy, a decrease in errors, or perhaps the ability to apply greater force" (CRATTV, 1973, 10).
- (2) "By a skilled response I mean one in which receptor-effector-feedback processes are highly organized, both spatially and temporarily" (FITTS, 1954, 244).
- (3) "We begin to use the term "skill" only when a good many receptor and effector functions are interlinked and related within an order of significant succession which possesses an inherent character of direction" (BARTLETT, 1958, 13).

- (4) "Skill is the ability to execute a pattern of behavioral elements in proper relation to a certain environment" (JOHNSON, 1961, 163).
- (5) "A skill is a set of procedures to be used on particular occasions, a schema which embodies stimuli, responses, and relationships between them, or, in computer terminology, a subroutine, or program" (SCHAEFFER, 1975, 166).

Die ersten drei Definitionen beziehen sich eindeutig auf sensorisch-motorisches Verhalten, welches dann als "skill" bezeichnet wird, wenn aufgrund eines Lernprozesses eine Verknüpfung von sensorischen und motorischen Komponenten entstanden ist, die sich durch verbesserte Geschwindigkeit, Genauigkeit oder zeitliche Abfolge auszeichnet. In der vierten Definition wird die Anpassung an externe Faktoren hervorgehoben; im Sinne einer Zielorientierung ist dieser Aspekt auch schon in der dritten Definition enthalten.

Definition fünf bezieht sich auf kognitive Prozesse, ist aber in der zitierten Form auch auf sensomotorisches Verhalten anzuwenden. Neu sind die Begriffe "Schema" und "Programm" bzw. "Unterprogramm", die bei neueren Ansätzen zur Beschreibung sensomotorischer Fertigkeiten eine Rolle spielen. Darauf wird später eingegangen.

Der deutsche Begriff "Fertigkeit" kann ebenfalls auf Denkvorgänge bezogen werden; wir wollen ihn im folgenden jedoch immer als sensomotorische Fertigkeit verstanden wissen. RUSSEL (1976,46) hält den Begriff "Können" für die angemessene Übersetzung von "skill". Da "Können" jedoch umgangssprachlich stärker geprägt ist als "Fertigkeit", wollen wir ihm in diesem Punkt nicht folgen.

Ein zweiter zu erklärender Begriff ist der des "sensomotorischen Lernens". Ähnlich wie beim Begriff "Fertigkeit" finden sich auch hier unterschiedliche Termini, je nach Forschungsintention und Fachzugehörigkeit. "Motorisches Lernen" wird vor allem von Vertretern der Leibeserziehung (physical education) verwendet, wohingegen Psychologen eher Termini wie "psycho-

motorisch" (psychomotor) oder "sensomotorisch" (sensorymotor, perceptualmotor) verwenden (SINGER, 1975, 13). SINGER fährt fort: "The obvious advantage in using perceptual or psycho in front of motor is that they more adequately suggest the true nature of the behaviors. Motor by itself implies muscular movement, as if reflexive or with little cognitive and perceptual involvement. But the truth is that the real-life skills that we learn are usually somewhat complex and involve a high degree of cue detection, evaluation, and decision making. The actual response is only one feature of the entire act" (SINGER, 1975, 13). In diesem Sinne verwenden wir in der vorliegenden Arbeit die Bezeichnung sensomotorisches Lernen.

In den folgenden Abschnitten des ersten Kapitels wird versucht, einen Überblick über den Stand der Erforschung sensomotorischen Verhaltens zu geben. Auf entwicklungspsychologische Aspekte kann dabei verzichtet werden, da im Mittelpunkt dieser Arbeit sensomotorisches Lernen beim Erwachsenen steht. Entsprechende Darstellungen zum Kindesalter finden sich z.B. bei KAY (1969) oder in dem Sammelband von CONNOLLY (1970).

1.1.2. Historischer Überblick

Vergleicht man die deutschsprachige mit der angloamerikanischen Literatur, so fällt auf, daß die Entwicklung der Forschung weitgehend unabhängig voneinander verlief. Englische und amerikanische Forscher haben bis heute kaum deutsche Untersuchungen rezipiert; umgekehrt gilt das gleiche bis etwa zum Zweiten Weltkrieg. Die Folge ist, daß sich teilweise ähnliche theoretische Ansätze gegenüberstehen, die jedoch begrifflich deutlich divergieren. Es scheint daher angebracht, kurz auf die historische Entwicklung einzugehen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit muß ein solcher Überblick jedoch auf die Darstellung einiger wesentlicher Beiträge beschränkt bleiben, wobei die Einschätzung hinsichtlich der Bedeutsamkeit natürlich die Einstellung des Verfassers widerspiegelt. Wir wollen in erster Linie deutlich machen, daß sensomotorische Prozesse von verschiedenen wissenschaftlichen Richtungen aus angegangen wurden und im Laufe der Forschungsentwicklung unterschiedliche inhaltliche und methodische Gesichtspunkte hervortraten.

Als einer der ersten bedeutsamen Beiträge wird von vielen Autoren (z.B. IRION, 1969) die Arbeit von BRYAN & HARTER (1899) gewertet. Sie untersuchten, wie das Senden und Empfangen von Morsezeichen erlernt wurde. Das wesentliche Ergebnis bestand darin, daß der Lernprozeß hierarchisch ablief ("hierarchy of habits"). Bei der Lernkurve für das Empfangen von Morsezeichen fanden die Autoren ein Plateau, das damit erklärt wurde, daß die in der Hierarchie untergeordneten Ebenen noch nicht ausreichend beherrscht wurden, um zu den höheren Ebenen (habits) überzugehen. Zuerst mußten die einzelnen Zeichen beherrscht werden, dann Silben, Wörter und schließlich Sätze.

Die Feststellung des Plateaus erwies sich später zwar als nicht haltbar (KELLER, 1958), die Entdeckung einer Hierarchie von Lernschritten ist jedoch bis heute in den Vorstellungen über den Erwerb sensomotorischer Fertigkeiten geblieben.

Eine weitere wichtige Untersuchung stammt vom WOODWORTH (1899). Er konnte bei einfachen Zielbewegungen zwei Phasen unterscheiden: die Bewegung begann mit einem "initial impulse", der quasi den gesamten Bewegungsablauf vorgab. In Zielnähe setzten dann Korrekturen ein, die von visueller Rückmeldung abhängig waren. Neben dem hierarchischen Aufbau von Fertigkeiten zeigte sich hier ein weiterer Aspekt, der bis heute Gültigkeit hat: Eine Bewegung kann weitgehend vor der Ausführung determiniert sein, exterozeptive Rückmeldung ist nur in begrenztem Umfang notwendig.

Aufgrund von Beobachtungen an Patienten, die an motorischer Apraxie litten, kam LIEPMANN zu ähnlichen Folgerungen; er prägte den Begriff "Bewegungsformel", worunter er "die in der Vorstellung antizipierten Teilaspekte" einer Bewegung zusammenfaßt (LIEPMANN, 1905, 45). RÜSSEL (1976, 32-39) referiert weitere Autoren, die für diesen Sachverhalt Begriffe wie "Bewegungsentwurf", "Handlungsentwurf" oder "Bewegungsplan" vorschlugen.

Die Arbeiten von TAYLOR und GILBRETH (s. z. B. ANASTASI, 1964) führen in den Jahren zwischen dem Ersten und Zweiten Weltkrieg

zu Untersuchungen im industriellen Bereich, bei denen praktische Fragen der Arbeitsgestaltung erforscht wurden (s. z.B. MAIER, 1973). Diese Entwicklung war für die Theorienbildung im Bereich des sensomotorischen Lernens wenig fruchtbar, da die Arbeiten zu sehr an praktischen Fragen orientiert blieben.

Im Rahmen der Unfallforschung wurden Zusammenhänge zwischen Unfallneigung und sensomotorischen Fertigkeiten untersucht. Neben einfachen Reaktions- und Handgeschicklichkeitstests wurden dabei auch schon frühzeitig komplexe sensomotorische Tätigkeiten simuliert, z.B. das Steuern von Fahrzeugen mit Hilfe von sog. Nachfahrproben, Fahrstraßen oder Fahrständen (vgl. MITTENECKER, 1962, 68).

Ein weiteres Forschungsfeld, die Sportpsychologie, lieferte in dieser Zeit die wesentlichen Impulse. CRATTY (1973, 20) nennt einige Beispiele von Untersuchungen, die sich mit der sensomotorischen Leistungsfähigkeit von Athleten befaßten. Die Sammelreferate von MCGEOCH (1927, 1929) zeigen, daß sich ein Schwerpunkt des Interesses darauf richtete, wie sich verschiedene Lern- oder Übungsbedingungen (z.B. Teillernen vs. ganzheitliches Lernen) in Lernkurven niederschlugen. Als neue Untersuchungsmethoden (Lernaufgaben) wurden z.B. Labyrinth oder der Pursuit Rotor eingesetzt. Die damals noch in den Anfängen steckende Entwicklung versuchstechnischer und statistischer Methoden ist wohl in erster Linie dafür verantwortlich, daß nur wenige Arbeiten heute noch Beachtung finden (zwei solcher Ausnahmen, BRYAN & HARTER und WOODWORTH, wurden bereits erwähnt).

Die Entwicklung der sog. Gestaltpsychologie weckte ein gesteigertes Interesse für Fragen der menschlichen Motorik. Beispiele für entsprechende Untersuchungen finden sich in Form von Dissertationen aus dem Psychologischen Institut der Universität Leipzig in der Zeitschrift "Neue Psychologische Studien" (Band 9, 1933), in denen verschiedene, meist sportliche Bewegungsverläufe unter gestaltpsychologischen Gesichtspunkten analysiert wurden.

Eine Integration und Weiterentwicklung dieser Ansätze versuchte v.WEIZSÄCKER (1940) in Form einer "Theorie der Einheit von Wahrnehmen und Bewegen" (Untertitel).

Die für den heutigen Stand der Erforschung sensomotorischen Lernens wichtigste Epoche begann im Zweiten Weltkrieg. Bei der Bedienung von neuentwickelten Waffensystemen, z.B. Flugabwehrgeschützen, traten Probleme auf, die durch Personalselektion alleine nicht zu lösen waren. Dies führte in den USA und in England zu einer Vielzahl von Forschungsprojekten, vor allem in Forschungsinstituten der Streitkräfte.

Die Erkenntnis, daß Selektion und Ausbildung von Bedienungskräften nicht ausreichten, die gewünschten Leistungen zu erzielen, machte eine Zusammenarbeit von Vertretern verschiedener Wissenschaftsdisziplinen erforderlich, da ohne Berücksichtigung von Erkenntnissen der jeweils anderen Disziplinen die Probleme nicht gelöst werden konnten. Man kann dies als Beginn der heute vielfach üblichen systemtheoretischen Betrachtungsweise ansehen. Die Maschine und der sie bedienende Mensch sind Teile eines Systems, bilden also in gewissem Sinne eine Einheit. Die Entwicklung von Maschinen ist daher nicht sinnvoll, wenn sie sich nicht an den Möglichkeiten und Grenzen des Menschen orientiert.

Dies war der Ausgangspunkt zur Entwicklung einer neuen, integrierenden Wissenschaftsdisziplin, der Kybernetik (WIENER, 1948). Zwar hatte WAGNER schon um 1925 regelungstechnische Vorstellungen auf physiologische Sachverhalte übertragen (vgl. WAGNER, 1954), dennoch bleibt WIENER das Verdienst, als erster Konzepte der Regelungstechnik, Nachrichtentechnik und Informationstheorie (SHANNON & WEAVER, 1949) integriert zu haben. Dieser Ansatz ist für viele Bereiche der Psychologie, vor allem für die Erforschung sensomotorischer Fertigkeiten, von grundlegender Bedeutung.

Einer der Forschungsschwerpunkte, die sich daraus entwickelt haben, steht mit dem Namen K.U.SMITH in Zusammenhang, der auch die Bezeichnung "Cybernetic Psychology" prägte (SMITH, 1972).

SMITH und Mitarbeiter untersuchten vor allem sensomotorische Leistungen bei veränderter Rückmeldung, z.B. Schreiben bei räumlich verlagelter visueller Rückmeldung. Auf eine ausführliche Darstellung kann hier verzichtet werden (s. SMITH, 1962; SMITH & SUSSMAN, 1969).

Auch eine der grundlegenden Techniken zur Untersuchung sensomotorischer Fertigkeiten wurde zu jener Zeit entwickelt, das Tracking. Allerdings handelt es sich dabei im wesentlichen um eine Weiterentwicklung der bereits erwähnten Fahrstraßen. Wichtige Aspekte dieser Weiterentwicklung sind die größere Abstraktion und die durch technische Neuentwicklungen (z.B. Computer) ermöglichte Verfeinerung der Analyse. "One of the lines of work developed in the forties was the tracking of moving targets - a problem derived from gunlaying. Tracking in many ways epitomises sensory-motor performance and is similar to various everyday tasks such as steering a vehicle. Precise study is, however, difficult in real-life situations so that the task was incorporated into a number of laboratory experiments aimed at the study of its essential features and designed to ascertain some of the important characteristics of human link in systems where man and machine interact" (WELFORD, 1968, 13-14). Untersuchungen der letzten 30 Jahre wurden zum größten Teil mit solchen Trackinganordnungen durchgeführt."

Die kybernetische Betrachtungsweise des Menschen als Element im Mensch-Maschine System wird im folgenden Abschnitt ausführlicher behandelt. Tracking als Untersuchungstechnik wurde auch bei den eigenen Untersuchungen verwendet. Als Einführung in die Methodik wird daher in Abschnitt 1.2 näher darauf eingegangen.

1.1.3 Kybernetische Betrachtungsweise: Mensch-Maschine System

Menschliches Handeln besteht zu einem großen Teil im Umgang mit Hilfsmitteln zur Erreichung eines bestimmten Zieles, sei es das Führen eines Kugelschreibers beim Schreiben, die Betätigung verschiedener Bedienelemente beim Arbeiten an oder mit einer Maschine oder die visuelle Informationsaufnahme von Anzeigen bei einer Überwachungstätigkeit. Die Manipulationen des Menschen sind abhängig vom jeweiligen Zustand der Objekte;

es bestehen Beziehungen oder Rückwirkungen vom Menschen zu den Objekten und umgekehrt.

Eine solche Struktur aus Elementen, zwischen denen gerichtete Beziehungen bestehen, bezeichnet man als System. "A man-machine system is an organization whose components are men and machines, working together to achieve a common goal and tied together by a communication network" (KENNEDY, 1963,16).

Das System als Ganzes hat eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen, die Elemente Mensch und Maschine müssen also dementsprechend interagieren. Der Mensch muß dabei vor allem Informationen über den jeweiligen Zustand des Systems (Istwert) aufnehmen und vergleichen, ob dieser mit dem geforderten Zustand (Sollwert) übereinstimmt. Ist keine Übereinstimmung vorhanden, so muß er auf das Element Maschine einwirken, um den geforderten Zustand herzustellen. Die wesentlichen Aufgaben des Menschen bestehen also in der Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und in Steuerimpulsen für die Maschine.

Wie im vorigen Abschnitt angedeutet wurde, entwickelte sich diese systemtheoretische Betrachtungsweise aufgrund der Tatsache, daß neue Maschinen konstruiert wurden und sich beim praktischen Einsatz herausstellte, daß der bedienende Mensch in einem oder mehreren der drei genannten Aspekte nicht die Leistung erbringen konnte, die im Sinne der geforderten Gesamtleistung des Systems notwendig war.

Die Folge war, daß die primär mit der Entwicklung und Konstruktion von Maschinen befaßten Ingenieure sich bei ihrer Tätigkeit nicht nur an den technischen Erfordernissen orientieren konnten, sondern schon frühzeitig psychologische Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit des Menschen bei der Bedienung von Maschinen in ihre Überlegungen mit einbeziehen mußten. Auf der anderen Seite waren Psychologen genötigt, sich mit den Möglichkeiten und Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit im Rahmen solcher für die Praxis relevanter Mensch-Maschine Systeme zu befassen. Es folgte eine Phase enger Zusammenarbeit von Ingenieuren und Psychologen. Später entwickelte sich daraus ein

neuer Wissenschaftszweig, das "human factors engineering" im amerikanischen Sprachgebrauch (z.B. McCORMICK, 1970; MEISTER, 1971, 1976) bzw. die "Ergonomie" im europäischen Sprachgebrauch (z.B. LANC, 1975).

Die unterschiedlichen Schwerpunkte ingenieurwissenschaftlicher und psychologischer Forschung erfuhren dadurch aber nur eine geringe Annäherung. Ergonomen sind in der Regel Ingenieure, die zusätzlich psychologische Kenntnisse besitzen. Sie sind eher an der Leistung des Systems Mensch-Maschine interessiert, Psychologen eher an inter- und intraindividuellen Aspekten des Systemelementes Mensch.

Dementsprechend sind die ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen eher praxisbezogen. Maschinen sollen nach Möglichkeit so konstruiert werden, daß das System als Ganzes trotz einer Reihe von Unzulänglichkeiten des Menschen optimal funktioniert. Dazu müssen Möglichkeiten und Grenzen des Menschen als Operateur in Systemen untersucht werden. TAYLOR (1957,252) faßte die Unterschiede so zusammen: "Human engineering aims first at building better systems and secondarily at improving the lot of the operator. Thus, whereas conventional psychology, both basic and applied, is anthropocentric, human engineering is mechanocentric".

Praktisch folgte daraus, daß Ingenieurwissenschaftler den Menschen als Glied eines Regelkreises betrachteten, dessen Einzelfunktionen denen von technischen Regelkreisen entsprachen. Technische Regelkreise lassen sich in der Regel mathematisch linear beschreiben. Menschliches Verhalten ist jedoch in vielen Aspekten nicht linear, die mathematische Beschreibung von Regelkreisen, bei denen der Mensch integriert ist, ist daher nur zu einem Teil linear, es bleibt eine Restgröße (remnant). Zur Beschreibung eines Systems dienen sogenannte Beschreibungsfunktionen (transfer functions). Sie charakterisieren die Relation von Eingangs- und Ausgangssignal. Dem nicht linearen Verhalten des Menschen versucht man durch "quasi-lineare" Modelle zu begegnen (z.B. LICKLIDER, 1960). Solche lineare Differentialgleichungen konnten immerhin bis

zu 95 % der Varianz erklären (PEW, 1970).

Psychologen haben zum Teil deutliche Kritik an dieser Vorgehensweise geübt (z.B. ADAMS, 1961). Der wesentliche Einwand bezieht sich darauf, daß das Verhalten des Menschen unter den gegebenen Bedingungen als statisch festgelegt wurde, weil in die Form einer linearen Gleichung gebracht. Die Anpassungs- und Lernfähigkeit sind es aber vor allem, die als Fehler bzw. Nichtlinearität auftreten, sie gehören zur nicht aufgeklärten Varianz. Neuere Arbeiten zeigen jedoch, daß bei geeigneter Anwendung solcher Modelle - indem man etwa die Parameter der Differentialgleichungen zu verschiedenen Zeitpunkten betrachtet - auch Aussagen über Veränderungen sensomotorischer Fertigkeiten gemacht werden können (z.B. FUCHS, 1962; PEW, 1970; PEW & RUPP, 1971).

Zu Beginn dieses Abschnittes wurden drei Komponenten sensomotorischen Verhaltens unterschieden: Informationsaufnahme, -verarbeitung und motorische Aktion. Die motorische Komponente ist bei einer systemtheoretischen Betrachtungsweise von besonderer Bedeutung: Sie kann direkt beobachtet werden; ungenügende Systemleistungen, die durch Fehler des Elements Mensch entstehen, werden daher zunächst auf das motorische Verhalten zurückgeführt. Die notwendigen motorischen Aktionen können entweder gar nicht, zum falschen Zeitpunkt und/oder in nicht-adäquater Weise durchgeführt werden.

Das motorische Verhalten kann jedoch nicht losgelöst von der Informationsaufnahme bzw. -verarbeitung betrachtet werden, da es sich immer um das Resultat dieser Prozesse handelt. Aus diesem Grund haben wir einleitend bereits den Terminus "sensomotorisch" favorisiert, weil er die Integration der drei Komponenten zum Ausdruck bringt.

Im folgenden Abschnitt werden diese Komponenten näher beschrieben und Beziehungen zwischen ihnen aufgezeigt. Daran anschließend sollen Ansätze zur theoretischen Integration dargestellt werden.

1.1.4 Komponenten sensomotorischer Fertigkeiten

Es ist schwierig, unser Wissen über die Komponenten sensomotorischer Fertigkeiten und die Beziehungen zwischen ihnen systematisch darzustellen. Die theoretischen und methodischen Ansätze der verschiedenen Forscher liegen in der Regel weit auseinander. Es wurden sehr unterschiedliche Aspekte sensomotorischen Verhaltens unter sehr speziellen Fragestellungen untersucht. Nur wenige Forscher versuchten im Sinne einer Theorienbildung voranzukommen. Der Bereich sensomotorischer Fertigkeiten wurde also im Gegensatz zu anderen Teilbereichen der Psychologie nicht oder nur ansatzweise systematisch untersucht. Man sammelte eine Vielzahl von Einzelbefunden, war aber nicht in der Lage, diese zu einem theoretischen Konzept zusammenzufassen. Auch die oben erwähnte Vielzahl von Definitionen des Begriffes "skill" liegt darin begründet, daß die Definition jeweils im praktischen Kontext vorgenommen wurde. ADAMS (1971, 112) verdeutlicht diesen Zustand folgendermaßen: "The research on skills today is as many-sided as the definition of skills, with research being done on such diverse topics as sports, music, the factory, and military jobs. In their totality these fields can embrace a full span of human performance from lifting a finger to flying an airplane or delivering a speech. In experimental psychology, topics like conditioning, for example, started out with a well-defined subject matter and paradigm, and pursued a systematic search for variables, laws, and theory. Research on skills, by contrast, has studied anything that looks skillful to the common sense eye. If the study of verbal behavior had gone the same way, we would have journals filled with studies on how to learn and remember novels, billboards, and theater mar-quees. Compared to the study of skills, the histories of verbal behavior and conditioning over the same period is a scientific story to be envied".

Wie heterogen und unvollständig unser Wissen über einzelne Aspekte sensomotorischer Fertigkeiten ist, zeigt sich auch daran, daß in den letzten 25 Jahren in relativ kurzen zeitlichen Abständen eine Fülle von Darstellungen publiziert wurden, die den jeweiligen Forschungsstand neu zusammenfaßten und

immer wieder neue offene Probleme darlegten (WELFORD, 1960; ADAMS, 1961, 1964, 1971; BILODEAU & BILODEAU, 1961; FITTS, 1964; BAHRICK & NOBLE, 1966; KEELE, 1968; NOBLE, 1968; IRION, 1969; PEW, 1974; SCHMIDT, 1975).

Das Blockschaltbild in Abbildung 1.1 (nach WELFORD, 1976, 3) faßt die im vorigen Abschnitt dargestellten, für sensomotorisches Handeln relevanten Komponenten zusammen. Informationen werden über Sinnesorgane sowohl aus der Umwelt als auch aus dem Körper (durch Propriozeptoren) wahrgenommen und im Kurzzeitgedächtnis gespeichert. Abgestimmt auf die erforderliche Aktion oder Reaktion werden Handlungsstrategien entworfen und in Handlungen umgesetzt. Sofern diese Handlungen zur Manipulation von Objekten der Umwelt führen (z.B. das Bedienen einer Maschine), können Rückmeldungen über den Handlungseffekt wieder über die Sinnesorgane aufgenommen werden; der Kreislauf schließt sich. Neben solchen externen Rückmeldungen sind einige interne Rückkoppelungen angedeutet. Entstehen feste Zuordnungen zwischen bestimmten Kategorien aufgenommener Information und erforderlichen Efferenzen, so können diese im Langzeitgedächtnis abgelegt werden; sie sind dann zum festen Bestandteil des Verhaltensrepertoires geworden.

Wir werden einige wesentliche Teilbereiche herausgreifen und näher darauf eingehen. Dabei beschränken wir uns auf solche Aspekte, die für die eigenen Untersuchungen relevant sind.

Informationsaufnahme

Informationen aus der Umwelt können über die verschiedenen Sinnesorgane gleichzeitig wahrgenommen werden, dies ist durch mehrere parallele Pfeile in Abbildung 1.1 angedeutet. Die Kapazität des Menschen für die Verarbeitung von Signalen ist jedoch begrenzt. VINCE (1948) konnte nachweisen, daß bei schneller Aufeinanderfolge von Signalen die Reaktionszeit für die Beantwortung des zweiten Signals langsamer war als die für das erste Signal. Der Organismus benötigt zur Verarbeitung von Signalen eine gewisse Erholungs- oder Refraktärzeit (bei VINCE etwa 0,5 Sekunden), bevor er auf ein neues Signal rea-

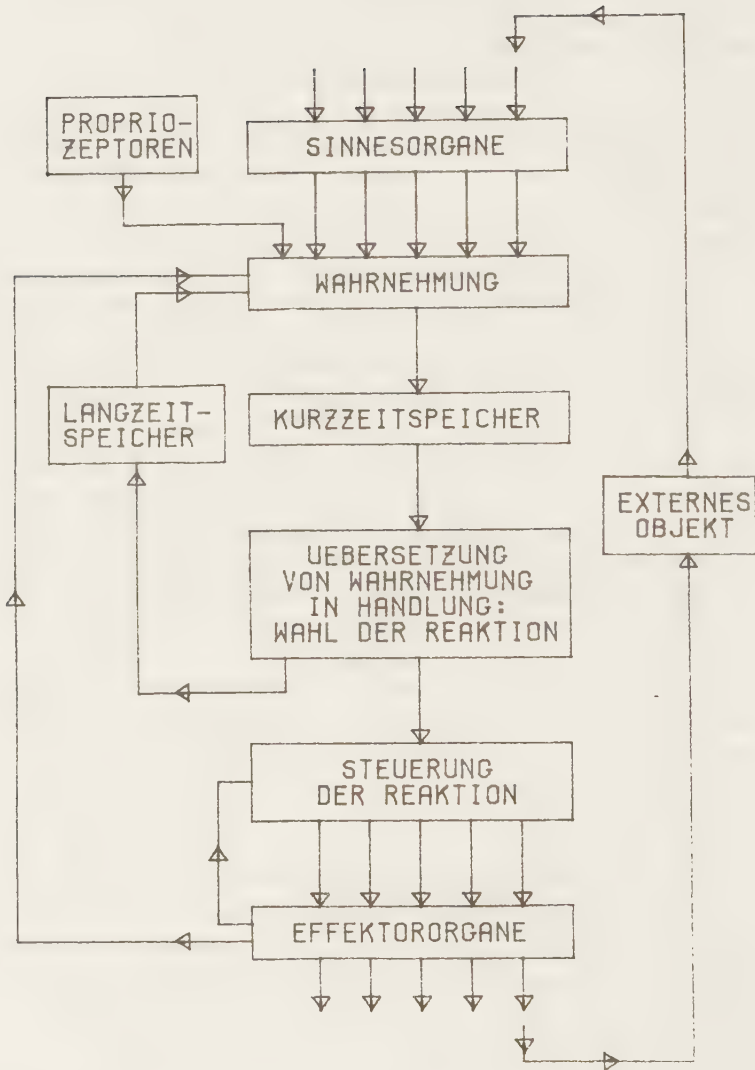


Abbildung 1.1

Blockschaltbild der wesentlichen Komponenten sensorimotorischen Verhaltens (nach WELFORD, 1976, 3).

gieren kann. (Der Begriff Refraktärzeit wurde in Anlehnung an den aus der Physiologie bekannten Begriff der Refraktärzeit bei der wiederholten Reizung von Nerven eingeführt und zur Abgrenzung oft als "psychologische Refraktärzeit" bezeichnet; vgl. WELFORD, 1952).

Der gleiche Effekt kann auftreten, wenn sowohl exterozeptive als auch kinästhetische oder andere propriozeptive Reize gleichzeitig verarbeitet werden müssen. Diese Reize müssen dann quasi "Schlange stehen" (WELFORD, 1960, 191), bevor sie berücksichtigt werden können. Dies führte zu der Auffassung, daß der zentrale Mechanismus zur Verarbeitung von Signalen nur einen Kanal (single channel) zur Verfügung hat (vgl. WELFORD, 1967). In Abbildung 1.1 sind die betreffenden Elemente daher jeweils nur durch einen Pfeil verbunden.

CRAIK (1947, 1948) folgerte daraus, daß der Mensch bei der Ausführung motorischer Handlungen nicht kontinuierlich, sondern nur intermittierend auf Veränderungen des externen Objektes reagieren kann. Ingenieurwissenschaftler bezeichnen in diesem Sinne den Menschen als "sampled-data system" (z.B. BEKEY, 1962). Die intermittierenden Korrekturen sind "ballistischer" Art, d.h. sie haben ein bestimmtes zeitliches Muster und werden als Ganzes abgerufen. Korrekturen laufender Bewegungen sind demnach nur zu bestimmten Zeitpunkten möglich und bestehen aus der Aneinanderreihung verschiedener solcher "ballistischen" Bewegungen.

Zeitlich-räumliche Koordination und Antizipation

Die zeitliche Einteilung spielt bei komplexen sensomotorischen Aktionen eine wesentliche Rolle. Das Fangen eines Balles kann z.B. nur gelingen, wenn die Bewegung der Hand zum Ball und das Schließen der Hand zum richtigen Zeitpunkt erfolgen. Dazu ist erforderlich, daß einmal die Position des Balles zeitlich antizipiert werden kann und zum anderen die notwendigen Bewegungen der beteiligten Körperglieder entsprechend koordiniert werden können, so daß sich Ball und Hand zu einem bestimmten Zeitpunkt treffen. Die Antizipation externer Ereig-

nisse, auf die reagiert werden soll, kann nach POULTON (1952a) auf zweierlei Weise geschehen: Einmal kann der zeitliche Verlauf direkt im voraus wahrgenommen werden (z.B. der Verlauf der Straße beim Autofahren), zum anderen kann der Verlauf bei wiederholten, ähnlich verlaufenden Ereignissen gelernt werden. Im ersten Fall spricht POULTON von "receptor anticipation", im zweiten Fall von "perceptual anticipation" (von RÜSSEL, 1976, 87 als Wahrnehmungs- und Erfahrungsantizipation übersetzt). Die Entstehung von Erfahrungsantizipationen bedeutet, daß Erwartungen bezüglich der zukünftigen Ereignisse und der damit zu verbindenden optimalen Reaktion entstehen. Die Reaktionen auf solche antizipierenden Reize müßten demnach deutlich schneller erfolgen, als auf nicht antizipierte Reize. Dies konnte in einer Reihe von Untersuchungen bestätigt werden (POULTON, 1952b; ADAMS & XHIGNESSE, 1960; ADAMS & CHAMBERS, 1962; NOBLE & TRUMBO, 1967). Einen zusammenfassenden Überblick gibt SCHMIDT (1968).

Eine wesentliche Grundlage für den zu Erfahrungsantizipation führenden Lernprozeß scheinen propriozeptive Signale zu liefern. ADAMS & XHIGNESSE (1960) führten eine Trackingaufgabe durch, bei der mit beiden Händen gleichzeitig zwei Sprungfunktionen gefolgt werden mußte. Vorgegeben waren zwei Gruppen vom Lämpchen, die räumlich so weit auseinanderlagen, daß sie nicht gleichzeitig im Gesichtsfeld der Vpn zu erkennen waren. Die Dauer und Reihenfolge des Aufleuchtens einzelner Lämpchen variierten nach unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten für beide Gruppen. Die Vpn mußten den Sprüngen mit der jeweiligen Hand simultan folgen. Es zeigte sich, daß die Vpn Zeitpunkt und Ausmaß der Sprünge antizipieren und dadurch in stärkerem Maße beide Teile der Aufgabe beachten konnten. Als Erklärung nehmen die Autoren an, daß die Vpn die Dauer der Abnahme propriozeptiver Reize als Zeitindikator ausnutzten: Die motorische Reaktion auf einen Sprung bewirkt einen propriozeptiven Impuls. In der Zeit bis zum nächsten Sprung findet keine Bewegung statt, der im Kurzzeitspeicher erfaßte Impuls nimmt also ab ("the initial proprioceptive discharge proceeds to decay in time"; ADAMS & XHIGNESSE, 1960, 401).

Der Gradient des Abfalles liefert Informationen über die zeitliche Dauer. Diese als "decay-hypothesis" bezeichnete Annahme (ADAMS & CREAMER, 1962) wurde u.a. von SCHMIDT & CHRISTINA (1969), CHRISTINA (1970, 1971) und QUESEDA & SCHMIDT (1970) überprüft. Die experimentellen Befunde konnten die Hypothese weder eindeutig stützen noch widerlegen. Das gilt auch für die alternativ vorgeschlagene "input-hypothesis", die besagt, daß propriozeptive Reize vorangegangener Reaktionen als Richtwerte für folgende Reaktionen dienen (vgl. SCHMIDT, 1971).

Auch für die Steuerung der Richtung und der räumlichen Erstreckung von Bewegungen spielen propriozeptive Reize eine Rolle. Ein wichtiger Erklärungsansatz leitet sich von der Vorstellung einer Efferenzkopie (v.HOLST & MITTELSTAEDT, 1950) ab. Ausgangspunkt war die Überlegung, daß eine Veränderung der visuellen Wahrnehmung sowohl durch Augenbewegungen als auch durch Veränderungen der Umwelt eintreten kann. Zur Aufschlüsselung dieser beiden Komponenten benötigt der Organismus eine Information über den Betrag der Veränderung, der auf die Augenbewegung zurückgeht. Die Vorstellung der Efferenzkopie besagt, daß eine Kopie der efferenten (motorischen) Signale mit der Änderung der Wahrnehmung verglichen wird. Übertragen auf sensomotorisches Verhalten bedeutet dies, daß eine Kopie des Bewegungsimpulses mit den bei der Bewegungsausführung entstehenden propriozeptiven Reizen verglichen wird. Bei fehlender exterozeptiver Rückmeldung ist auf diese Weise eine Beurteilung der "Bewegungsgüte" möglich. Dieses Modell ist jedoch nicht in der Lage, die Anpassung von Bewegungen an externe Ziele zu erklären, da nur das interne, im Bewegungsimpuls enthaltene Ziel mit den propriozeptiven Signalen verglichen wird. JONES (1974) hat daher ein "outflow-model" vorgeschlagen. Dieses Modell besagt, daß eine Efferenzkopie direkt mit exterozeptiver Rückmeldung verglichen werden kann und somit bei der Steuerung von Bewegungen auf propriozeptive Signale weitgehend verzichtet werden kann. Eine Reihe von Untersuchungen scheint diese Annahme zu bestätigen (z.B. LASZLO & MANNING, 1970; ANGEL, GARLAND & FISCHLER, 1971).

Automatisierung von Bewegungsabläufen, motorische Programme

Während also der Einfluß propriozeptiver Reize beim Erwerb sensomotorischer Fertigkeiten nicht eindeutig bestimmt ist, spielen exterozeptive Signale mit zunehmender Beherrschung der Aufgabe eine immer geringere Rolle, wie bereits einleitend am Beispiel des Autofahrens erläutert wurde. Bezogen auf das Blockschaltbild in Abbildung 1.1 bedeutet das eine Verminderung der Anforderungen an die Kanalkapazität der zentralen Mechanismen. Diese Sachverhalte werden in der Literatur mit unterschiedlichen Termini belegt. Wir folgen POSNER (1969) und verwenden den Begriff "Automatisierung" im Sinne größerer Kapazität der zentralen Einheiten und "Internalisierung" für die Verlagerung von exterozeptiven auf propriozeptive Reize.

Eine Internalisierung ist experimentell nur schwer zu erfassen, außerdem ist, wie bereits erwähnt, die Bedeutung propriozeptiver Signale für eine Bewegungskontrolle nicht eindeutig geklärt. Die Automatisierung von Bewegungen läßt sich jedoch leicht überprüfen. Da die gesamte Kanalkapazität begrenzt ist, muß mit zunehmender Automatisierung ein größerer Teil frei werden und für andere Aktivitäten zur Verfügung stehen. Bezogen auf das eingangs erwähnte Beispiel des Autofahrens äußert sich das darin, daß ein geübter Fahrer, dessen sensomotorische Abläufe weitgehend automatisiert sind, mehrere Dinge zur gleichen Zeit tun kann, z.B. sich während des Fahrens unterhalten. Den freien Anteil der Kanalkapazität (spare mental capacity) kann man messen. BROWN & POULTON (1961) boten z.B. unterschiedlich geübten Fahrern während des Autofahrens Zahlenreihen dar, die sich jeweils in einer Zahl unterschieden. Diese Zahl sollte genannt werden. Mit zunehmender Fahrpraxis nahm die Anzahl richtig erkannter Unterschiede zu. Durch Zusatz Tätigkeiten läßt sich also die freie Kanalkapazität messen; man erhält dadurch einen Index für den Grad der Automatisierung. Wir werden darauf im Abschnitt 1.3.2 zurückkommen.

Bestimmte Zuordnungen von propriozeptiven oder exterozeptiven Eingangssignalen und effektorischen Ausgangssignalen werden offensichtlich im Langzeitspeicher abgelegt (vgl. z.B. AMMONS et al., 1958). Es handelt sich um sensomotorische Koordinationen, die über längere Zeit "behalten" werden und bei Bedarf jederzeit abgerufen werden können, ohne daß eine erneute Lernphase erforderlich ist. Beispiele solcher Koordinationsleistungen sind Schwimmen und Radfahren.

Eine solche, im Langzeitgedächtnis gespeicherte sensomotorische Fertigkeit wird häufig als motorisches Programm bezeichnet. "The concept of a motor program may be viewed as a set of muscle commands that are structured before a movement sequence begins, and that allows the entire sequence to be carried out uninfluenced by peripheral feedback" (KEELE, 1968, 387). Es konnte wiederholt nachgewiesen werden, daß bei der Nachführung regelmäßiger Signale ("coherent stimulus patterns" in der Terminologie von NOBLE & TRUMBO, 1967) sowohl in zeitlicher als auch räumlicher Hinsicht Bewegungsmuster im Sinne von Programmen entstanden (z.B. FUCHS, 1962; PEW, 1966). Einen zusammenfassenden Überblick gibt KEELE (1968).

1.1.5 Stand der Theorienbildung

Theorien des sensomotorischen Lernens müssen die in experimentellen und empirischen Einzelbefunden enthaltenen systematischen und übergreifenden Tatbestände integrieren. Sie sollten in der Lage sein, möglichst viele dieser Einzelbefunde vorherzusagen und/oder zu erklären. Wegen der Heterogenität der Fragestellungen und Ergebnisse von Untersuchungen zum sensomotorischen Lernen gibt es relativ viele theoretische Ansätze. Wir werden einige ältere Theorien kurz erläutern und dann etwas ausführlicher auf systemtheoretisch orientierte Ansätze eingehen.

Klassische Reiz-Reaktions- (S-R-)Theorien machen im wesentlichen Aussagen über die Auftretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen. Beim Erlernen sensomotorischer Handlungen ändern sich zwar auch die Auftretenswahrscheinlichkeiten einzelner Handlungskomponenten, entscheidender sind jedoch Änderungen der Handlungsstruktur. Diesem Aspekt können S-R-Theorien (z.B.

WASSERMAN, 1952) kaum Rechnung tragen. GAGNÉ (1965) versuchte diese Schwierigkeit in seinem "chaining"-Modell zu umgehen, indem er S-R-Konzepte auf einzelne Handlungselemente und deren "Verkettung" anwendete. Danach müssen zuerst die Elemente gelernt werden, dann Reihenfolge und Art der Verknüpfung dieser Elemente. Dieser Ansatz ist kaum in der Lage, die Anpassung sensomotorischen Verhaltens an Änderungen der subjektiven und externen Gegebenheiten zu erklären oder vorherzusagen.

Solche Aspekte sensomotorischen Lernens sind Bestandteil theoretischer Ansätze, die von einer kybernetischen Betrachtungsweise ausgehen. Diese ersetzen die Vorstellung linearer Reiz-Reaktionsverbindungen durch ein Regelkreismodell. Es wurde bereits erwähnt, daß dieses Modell im Bereich der Physiologie von WAGNER eingeführt wurde. v.HOLST & MITTELSTAEDT (1950) unterschieden zwischen Reafferenzen und Exafferenzen, worunter die aus körpereigenen und externen Veränderungen resultierenden Anteile der Afferenz verstanden wurden.

Auf psychologische Sachverhalte wurden diese Ansätze von MILLER, GALANTER & PRIBRAM (1960) übertragen. Ihr TOTE-Modell (test-operate-test-exit) stellt eine einfache Form eines geschlossenen Regelkreises dar und besagt, daß in einem zyklischen Prozeß Ist- und Sollwert verglichen werden (test). Besteht keine Übereinstimmung, so werden Korrekturen vorgenommen (operate) und eine erneute Prüfung vorgenommen. Dies wiederholt sich solange, bis Übereinstimmung herrscht und der Zyklus beendet wird (exit).

Die Arbeit von MILLER, GALANTER & PRIBRAM (1960) sowie andere ähnliche Ansätze dieser Art, z.B. BERNSTEIN (1967) oder HENRY & ROGERS (1960), stellen jedoch kaum mehr als beschreibende Ablaufschemata dar und enthalten keine eindeutig prüfbaren Aussagen. Erst ADAMS (1971) versuchte mit der Veröffentlichung seiner Regelkreistheorie ("closed-loop theory") einen neuen Anfang. Er beschränkte sich auf einfache, klar begrenzte Bewegungen (graded responses) und definierte die Elemente seiner Theorie operational. Innerhalb kurzer Zeit wurden daraufhin zahlreiche Experimente veröffentlicht, in denen die Annahmen

der Theorie überprüft wurden.

ADAMS kritisierte die Anwendung klassischer S-R-Theorien auf sensomotorisches Lernen. Ein wesentlicher Punkt der Kritik betrifft die Tatsache, daß S-R-Theorien Aussagen über die Auftretenswahrscheinlichkeit von Handlungen machen, während ein entscheidender Aspekt sensomotorischen Lernens in der Korrektur von Fehlern besteht. Falsche und ungenaue Aktionen werden nicht gelöscht, sondern verbessert. ADAMS vergleicht klassische S-R-Theorien daher mit offenen Regelsystemen (open-loop systems), die keinerlei Rückmeldungsschleife zur Fehlerkorrektur enthalten. Bei geschlossenen Regelsystemen (closed-loop systems) wird jedoch die Rückmeldung über Fehler bzw. Abweichungen vom Sollwert zur Korrektur dieser Abweichungen genutzt. Rückmeldung (knowledge of result; KR) ist also eine zentrale Variable zur Beeinflussung des Lernverlaufes. Sie kann qualitativ (richtig/falsch) oder quantitativ (1cm zu kurz) sein, direkt verbal formuliert (vom Versuchsleiter) oder von der Vp verbalisiert werden. Letzteres ist der Fall beim Vergleich exterozeptiver oder propriozeptiver Reize über den Bewegungsverlauf mit dem geforderten Verlauf. Das Anfangsstadium sensomotorischer Lernverläufe bezeichnet ADAMS daher als verbalmotorisches Stadium ("verbal-motor stage"). Mit zunehmender Übung nimmt die Bedeutung der (verbal formulierbaren) Rückmeldung ab; dies führt zum motorischen Stadium ("motor stage").

ADAMS unterscheidet zwei Formen der Speicherung von Bewegungsstrukturen im Gedächtnis. Die "memory trace" beinhaltet den Entwurf einer Bewegung, die "perceptual trace" steuert den genauen Verlauf der Bewegung. Diese Unterscheidung ist notwendig, da sensomotorische Koordination je nach den Umgebungsbedingungen unterschiedlich ausfallen kann (das Schriftbild eines Menschen bleibt z.B. konstant, unabhängig von der Amplitude der Schrift oder dem Schreibgerät; Gehen auf unebener Fläche ist ähnlich gut koordiniert wie auf ebener Fläche).

Schon vor ADAMS hat RÜSSEL den gleichen Sachverhalt beschrieben und entsprechende Begriffe eingeführt, vor allem die Termini "Bewegungsentwurf", "Rahmenkoordination" und "Feinkoordi-

nation" (vgl. RUSSEL, 1976).

Ein Bewegungsentwurf enthält die wesentlichen Teile des Bewegungsablaufes, ohne die Bewegungsausführung vollständig vorwegzunehmen. Unter Rahmenkoordination versteht RUSSEL im Langzeitgedächtnis gespeicherte Grundlagen sensomotorischer Koordinationsleistungen; die Feinkoordination beinhaltet organ- und aufgabenspezifische Ausführungsmodalitäten einer Koordinationsleistung.

Im vorigen Abschnitt haben wir in Anlehnung an den angloamerikanischen Sprachgebrauch den Begriff "motorisches Programm" eingeführt. Motorisches Programm, "memory trace" und Rahmenkoordination sind also im wesentlichen Bezeichnungen für den gleichen Sachverhalt und beziehen sich auf Grundlagen sensomotorischer Koordinationsleistungen, die im Langzeitgedächtnis gespeichert sind.

Die "perceptual trace" bei ADAMS entspricht weitgehend der Feinkoordination RUSSELS. Beide müssen entsprechend der jeweiligen Aufgabensituation neu erworben oder angepaßt werden, es handelt sich daher um Prozesse im Kurzzeitgedächtnis. Es zeigen sich wieder starke inhaltliche Überschneidungen mit bereits eingeführten Termini, in diesem Fall den Begriffen "Automatisierung" und "Internalisierung".

SCHMIDT (1975) entwickelte in Anlehnung an ADAMS eine "schema theory of discrete motor learning". Der Begriff Schema wurde von BARTLETT (1932) übernommen und von PEW (1970, 1974) auf sensomotorisches Verhalten übertragen. Ein solches Schema entsteht bei wiederholter Ausführung gleichartiger Bewegungen und enthält nach SCHMIDT die für die Bewegung charakteristischen Relationen zwischen folgenden Größen:

- (1) Ausgangslage des Organismus und der Umwelt ("initial conditions"),
- (2) Charakteristika der ausgeführten Bewegung, z.B. Krafteinsatz, Geschwindigkeit etc. ("response specifications"),
- (3) Sensorische Konsequenzen der Bewegung, propriozeptive und andere Rückmeldungen ("sensory consequences") und
- (4) Erfolg der Bewegung ("response outcome").

Soll eine Bewegung ausgeführt werden, für die bereits ein solches Schema existiert, so laufen zwei parallele Prozesse ab:

- (1) Die im Schema gespeicherten Beziehungen zwischen Ausgangslage und Bewegungscharakteristik werden auf die momentan wahrgenommene Ausgangslage bezogen und eine entsprechende Bewegung initiiert ("recall schema").
- (2) Aufgrund der im Schema gespeicherten Beziehungen zwischen Bewegungskonsequenzen und entsprechenden sensorischen Informationen werden die sensorischen Konsequenzen (propriozeptive und exterozeptive Rückmeldungen) der Bewegung antizipiert ("recognition schema").

Die Übereinstimmung von antizipierten und tatsächlichen sensorischen Rückmeldungen gibt über die Güte der Bewegung Auskunft und damit über die Angemessenheit des Schemas, das entsprechend modifiziert oder verstärkt wird. Lernen besteht also in einer Anpassung des Schemas an neue situative Gegebenheiten. Auch völlig neuartige Bewegungsformen können auf diese Weise durch Anpassung bestehender Schemata gelernt und zur Fertigkeit entwickelt werden.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Theorie gegenüber anderen besteht darin, daß nicht für jede Art von Bewegung verschiedener Gliedmaßen ein spezielles Programm vorhanden sein muß, sondern relativ allgemeine Schemata entsprechend den spezifischen Bedingungen modifiziert und angepaßt werden.

Damit ist der Begriff des Schemas weitgehend identisch mit der Rahmenkoordination RÜSSELS, die ausdrücklich als "organunspezifisch" bezeichnet wird (RÜSSEL, 1976, 62), während die Feinkoordination die organ- und aufgabenspezifischen Anteile einer koordinierten Bewegung umfaßt. Außerdem findet sich der Begriff Schema bereits bei BUYTENDIJK (1956, 280). Er führt aus, daß der Bewegungsplan schematisiert wird und nur einige wesentliche Merkmale des gesamten Verlaufs enthält.

Wir stellen also fest, daß die im angloamerikanischen Bereich als wesentliche Neuentwicklungen apostrophierten Theorien

von ADAMS und SCHMIDT zwar einige neue Begriffe eingeführt haben, inhaltlich jedoch keine wesentlichen Fortschritte brachten. Es kommt hinzu, daß beide Theorien ausdrücklich auf einfache Bewegungsformen beschränkt sind, "Tracking and other continuous tasks are deliberately excluded from this article because of the rather complex simultaneous interaction between sensory input and motor output" (SCHMIDT, 1975, 230).

Demgegenüber versuchte PEW (1970, 1974) eine prozeßorientierte Theorie zu entwickeln, die ohne diese Beschränkung auskommt. Er ordnet sensomotorisches Verhalten auf einer Dimension der Komplexität an und unterscheidet drei wesentliche Ebenen:

- (1) Eine untere Ebene, auf der, vereinfacht ausgedrückt, ein rudimentärer Servomechanismus angewendet wird, der auf wahrgenommene Abweichungen von Ist- und Sollwert reagiert. Dies gilt vor allem für nicht vorhersehbare Ereignisse, auf die reagiert werden soll. Der Organismus muß auf Abweichungen warten, um dann korrigierend eingreifen zu können.
- (2) Die nächste Ebene betrifft Verhalten, das zwar noch an den Reizen der Umwelt orientiert ist, aber zu komplexen Mustern zusammengefaßt werden kann.
- (3) Die dritte Ebene beschreibt er als Willkürbewegungen, dazu gehört vor allem die Lokomotion.

PEW (1974) sieht die Übergänge zwischen den Ebenen als kontinuierlich an, der Erwerb sensomotorischer Fertigkeiten umfaßt also den gesamten Bereich motorischen Handelns. Die Ausbildung von Schemata ist auf der dritten Ebene am stärksten ausgeprägt, aber bereits auf der unteren Ebene rudimentär möglich.

1.1.6 Zusammenfassung

Sensomotorische Leistungen des Menschen wurden seit etwa 80 Jahren untersucht, also seit den Anfängen der experimentellen Psychologie. Im Gegensatz zu anderen Teilbereichen, die sich relativ systematisch entwickelten und theoriegeleitet vorgingen, wurden bei der Erforschung sensomotorischer Leistungen vor

allem praxisrelevante Fragestellungen untersucht. Dies hatte zur Folge, daß eine Vielzahl von Einzelbefunden vorliegen, eine theoretische Aufarbeitung aber weitgehend fehlt.

Grundlage der wichtigsten theoretischen Ansätze ist eine kybernetische Betrachtungsweise: Sensomotorisches Verhalten beinhaltet die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen über den Zustand der Umwelt sowie die Auswahl einer daraus abgeleiteten motorischen Aktion. Direkt erfaßbar sind nur die Eingangsbedingungen und die motorische Aktion als Ausgangsvariable.

Dementsprechend besteht eine Methode zur Beschreibung sensomotorischen Verhaltens in der mathematischen Formulierung einer Beschreibungsfunktion, die eine lineare Beziehung zwischen Eingang und Ausgang angibt. Diese, von Ingenieurwissenschaftlern bevorzugte Methode stößt bei Psychologen häufig auf Kritik. Psychologische Forschung interessiert sich stärker für die im Individuum ablaufenden Prozesse.

Drei neue psychologische Theorien (ADAMS, SCHMIDT und PEW) wurden dargestellt. Sie zeichnen sich gegenüber mehr phänomenologisch orientierten Ansätzen (v. WEITZSÄCKER und BUXTENDIJK) durch einen anderen Begriffsapparat aus, gehen jedoch inhaltlich nicht wesentlich über diese hinaus. Zudem beschränken sie sich auf einfache Zielbewegungen; komplexere Bewegungsverläufe, wie sie etwa bei der Nachführung kontinuierlicher Signale in einer Trackingaufgabe vorkommen, bleiben ausgeklammert. Die vorliegende Arbeit versucht, einen Schritt in diese Richtung zu gehen. Das Interesse richtet sich dabei auf sensomotorische Prozesse beim Umgang mit Maschinen im weitesten Sinne; Probleme der Lokomotion werden nicht behandelt.

1.2 Tracking als Untersuchungstechnik

Viele der berichteten Ergebnisse zum sensomotorischen Lernen sind mit Hilfe von Trackinganordnungen gewonnen worden. Diese Technik, die auch bei den eigenen Untersuchungen verwendet wurde, wird im folgenden beschrieben. Dabei soll verdeutlicht

werden, daß bei Trackingaufgaben Lernprozesse stattfinden, und durch Variation relativ einfacher Kenngrößen unterschiedliche Lernprozesse evoziert werden können. Anschließend werden Möglichkeiten der Datenregistrierung und Auswertung zur Beurteilung solcher Lernprozesse dargestellt.

Die Methode des Tracking wurde im Zweiten Weltkrieg im Rahmen von Untersuchungen der Leistungsfähigkeit menschlicher Operateure bei der Bedienung neuer Kriegsgeräte (Flugabwehrgeschütze, neue Flugzeuge) entwickelt. Wie die beiden genannten Beispiele andeuten, bestand das wesentliche Merkmal der untersuchten Aufgabe darin, daß eine sensomotorische Handlung erforderlich war, mit der das Gerät (Maschine) auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet bzw. einem sich bewegenden Ziel gefolgt werden mußte; daher auch die Bezeichnung Tracking. Vorläufer solcher Trackinganordnungen waren die bereits erwähnten Fahrstraßen.

1.2.1 Charakterisierung von Trackingaufgaben

Die aus diesen Ansätzen entwickelten experimentellen Trackinganordnungen weisen drei wesentliche Merkmale auf:

- (a) Es gibt ein Eingangssignal (Führungsgröße; Sollwert) mit einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf;
- (b) der Vp steht ein sogenanntes Bedienelement (Drehknopf, Hebel, Steuerknüppel o.ä.) zur Verfügung, dessen Betätigung ein Ausgangssignal (Istwert) produziert.
- (c) Aufgabe der Vp ist es, ein Ausgangssignal mit gleichem zeitlichen Verlauf wie das extern vorgegebene Eingangssignal zu produzieren, oder, anders ausgedrückt, sie soll ein Bediensignal (Betätigung des Bedienelements) produzieren, das die Abweichungen von Soll- und Istwert minimiert. (Die Bezeichnung "Signal" bzw. "Führungsgröße" impliziert einen zeitlichen Verlauf; mit Sollwert bzw. Istwert wird die jeweilige Position bezeichnet.)

Wir beschränken uns auf Trackinganordnungen mit optischer Anzeige von Eingangssignal und Ausgangssignal. Beide Signale erscheinen dabei in der Regel als Marken auf dem Bildschirm

eines Oszillographen. Anstelle der von uns verwendeten werden in der Literatur auch andere Begriffe gebraucht. Wir werden im folgenden, um Begriffsverwirrungen zu vermeiden, nur die Begriffe Führungsgröße bzw. Sollwert, Bediensignal und Ausgangssignal bzw. Istwert verwenden.

Abbildung 1.2 zeigt Blockdarstellungen zweier Trackinganordnungen. Unabhängige Variablen sind demnach die Art der Führungsgröße und der Anzeige sowie Eigenschaften des Bedienelementes und der Regelstrecke. Die abhängige Variable ist die Güte der Trackingleistung, also Übereinstimmung von Sollwert und Istwert. Im folgenden Abschnitt werden Variationen der unabhängigen Variablen dargestellt. Anschließend werden Methoden zur Quantifizierung der abhängigen Variablen beschrieben. Dazu liegen eine Reihe von zusammenfassenden Darstellungen vor (z.B. POULTON, 1966, 1969, 1974), so daß wir uns auf die für die eigenen Untersuchungen relevanten Aspekte beschränken können.

1.2.2 Unabhängige Variablen

Anzeigen

Die beiden Hauptformen von Trackinganordnungen sind Folgetracking (pursuit tracking) und kompensatorisches Tracking (compensatory tracking). Wie in Abbildung 1.2 zu erkennen ist, unterscheiden sich beide Formen nur in der Art der Anzeige: Beim Folgetracking wird sowohl die Führungsgröße (hier eine senkrechte Linie) als auch der Istwert (hier ein Kreis) abgebildet. Beim kompensatorischen Tracking wird nur die Differenz zwischen jeweiligem Sollwert und Istwert angezeigt, es wird also nur eine veränderliche Marke abgebildet (hier ein Kreis). Die Entfernung dieses Kreises von einem festen Nullpunkt (hier die Linie) entspricht der Abweichung, die zu Null geregelt (kompensiert) werden soll.

Beim Folgetracking sind also zeitlicher Verlauf von Führungsgröße und Istwert für die V_p getrennt zu beobachten, auftretende Abweichungen können relativ leicht auf Änderungen der

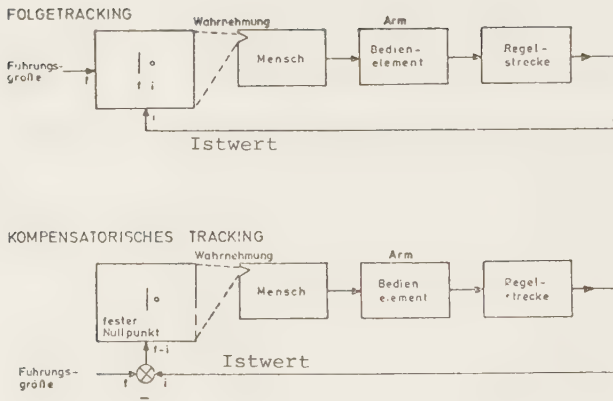


Abbildung 1.2

Schematische Darstellung von Folgetracking und kompensatorischem Tracking.

Führungsgröße oder Fehler der V_p (Istwert) zurückgeführt werden. Dies ist beim kompensatorischen Tracking nicht direkt möglich, da sich zeitliche Änderungen von Führungsgröße und Istwert überlagern. Entsprechend ergaben sich bei experimentellen Vergleichen deutliche Leistungsunterschiede zugunsten von Folgetrackinganordnungen (z.B. POULTON, 1952a, 1952b). Bei Führungsgrößen von geringer Frequenz und integraler Transformation des Bediensignals (das Bediensignal bewirkt eine Veränderung der Geschwindigkeit des Istwertes) kann jedoch kompensatorisches Tracking zu besseren Leistungen führen (CHERNIKOFF & TAYLOR, 1957; vgl. auch die Kritik von BRIGGS, 1966 an POULTON, 1966).

Bei Folgetrackinganordnungen mit visueller Darbietung von Sollwert und Istwert sind bei der Wahl der Anzeige nur wenige Punkte zu beachten. Die Beleuchtungsverhältnisse, also

Helligkeit der Anzeige und Umgebung sowie die Kontrastverhältnisse, müssen so gewählt werden, daß eine möglichst gute Wahrnehmung gewährleistet ist. In der Regel benutzt man Oszillographen oder andere Bildschirme. Aufgrund der relativ geringen Größe solcher Bildschirme darf der Abstand der Vpn zum Bildschirm nicht zu groß gewählt werden. Der optimale Abstand beträgt etwa 50 cm (18 inches; POULTON, 1966, 374). Um den Vorteil einer Folgetrackinganordnung, also getrennte Wahrnehmung von Soll- und Istwert, ausnutzen zu können, müssen beide Marken deutlich zu unterscheiden sein, auch bei gleicher Position.

Führungsgrößen

Prinzipiell lassen sich kontinuierliche und diskrete Führungsgrößen unterscheiden. Diskrete Führungsgrößen erfordern einen möglichst schnellen und genauen Übergang von einer Position zu einer anderen. Die von der Vp geforderten Bewegungen sind daher prinzipiell ähnlich, sie variieren nur in ihrer Amplitude bei Sprüngen unterschiedlichen Ausmaßes. Sprungfunktionen erfordern ähnliche Leistungen wie Reaktionsaufgaben mit einer Bewegungskomponente zur Erreichung der Reaktionstaste. Sie eignen sich daher vor allem zur Ermittlung von motorischen Reaktionszeiten.

Kontinuierliche Führungsgrößen, z.B. harmonische Schwingungen, erfordern demgegenüber auch ein kontinuierliches Bediensignal der Vp, das den Amplituden- und Frequenzeigenschaften der Führungsgröße angepaßt werden muß. Häufig verwendete kontinuierliche Führungsgrößen sind einzelne Sinusschwingungen oder Überlagerungen mehrerer Sinusschwingungen.

Frequenzen bis zu etwa zwei Hz kann bei einfachen Sinusschwingungen gut gefolgt werden (PEW, DUFFENDACK & FENSCH, 1967), d.h. daß sich nach längerer Übungszeit die Fehlerwerte für Frequenzen bis zu zwei Hz auf einem ähnlich niedrigen Niveau einpendeln. Ab dieser Frequenz liegen die Fehlerwerte selbst bei geübten Vpn deutlich höher (vgl. auch NOBLE, FITTS & WARREN, 1955). Einfache Sinusschwingungen zeichnen sich durch

gute Vorhersagbarkeit aus. Die Vpn erkennen schnell die Regelmäßigkeiten und können ihre Bewegungsstruktur darauf einstellen.

Die Vorhersagbarkeit nimmt bei der Überlagerung mehrerer Sinusschwingungen ab. Die Periodizität hängt von der Einzelschwingung mit der geringsten Frequenz ab, d.h. eine Wiederholung des zeitlichen Musters kann frühestens nach einer Periode der Schwingung mit der kleinsten Frequenz auftreten. Je höher der relative Amplitudenanteil der Schwingung mit der langsamsten Frequenz ist, desto größer ist die mittlere Amplitude der überlagerten Schwingung und desto besser wird der mögliche Amplitudenbereich ausgenutzt. ELKIND (1956; nach POULTON, 1974, 125) stellte fest, daß die Vpn zeitlich um so länger hinter einer solchen Führungsgröße zurückblieben, je höher die Einzelfrequenzen waren. Betrug die maximale Einzelfrequenz ca. 2,5 Hz (144 Schwingungen pro Minute), so ergab sich im Mittel ein Rückhalt von 0,18 Sekunden. Dies entspricht etwa der visuellen Reaktionszeit auf einfache Reize, liegt jedoch deutlich unter der Reaktionszeit für unerwartete Sprünge von etwa 0,4 Sekunden (GOTTSDANKER, 1956).

Bedienelemente

Ein Bedienelement setzt das Bediensignal der Vp (eine Bewegung) in ein vom Systemelement Maschine als Eingangssignal verwertbares Signal, in der Regel eine Spannung, um. Es kommen Hebel, Räder, Drucktasten, Steuerknüppel oder ähnliches in Frage. Diese Bedienelemente sind so gestaltet, daß man eine der jeweiligen Position entsprechende Spannung abgreifen kann, z.B. über ein Potentiometer.

Ein hoher Widerstand des Bedienelementes wirkt sich in der Regel negativ auf die Leistung aus. Nimmt der Widerstand aber bei einer Auslenkung aus der Nullage kontinuierlich zu (z.B. durch Federzentrierung), so fördert das die Trackingleistung, wahrscheinlich aufgrund der zusätzlichen Rückmeldung über die momentane Position.

Kompatible Zuordnungen sind einfacher zu beherrschen (LOVELESS, 1962), spielen jedoch beim kompensatorischen Tracking eine größere Rolle als beim Folgetracking.

Eigenschaften der Regelstrecke

Die Regelstrecke setzt das am Bedienelement abgegriffene Bediensignal in das Ausgangssignal des Systems um. Die Art der Umsetzung (Transformation) hängt von den Eigenschaften der Regelstrecke ab. Die Transformation kann in räumlicher oder zeitlicher Dimension erfolgen. Zu den räumlichen Transformationen gehören seitliche Verlagerungen, Drehungen oder Invertierungen. Zeitliche Transformationen können Verzögerungen des Istwertes in Relation zum Bediensignal erzeugen.

Zu den gebräuchlichsten Transformationen gehören proportionale, integrale und differentiale Transformationen. In der angloamerikanischen Literatur werden die Transformationen hierarchisch geordnet als "order of control" dargestellt (z.B. KELLEY, 1968, 29-33; BEKEY, 1970, 262).

Eine Regelstrecke nullter Ordnung (proportional) ist am einfachsten zu beherrschen, da eine direkte Beziehung zwischen Bediensignal und Istwert besteht, die nur durch den Verstärkungsfaktor bestimmt wird. Der Mensch braucht eigentlich nur als "Verstärker" zu fungieren (Zuordnung vom Amplitude des Bediensignals zu Amplitude des Ausgangssignals).

Bei einer Regelstrecke erster Ordnung (Integration) bestimmt die Amplitude des Bediensignals die Geschwindigkeit des Ausgangssignals, also der Istwert-Veränderung. Zur Beherrschung einer solchen Regelstrecke muß das zeitliche Muster der Geschwindigkeitsveränderung der Führungsgröße erkannt werden, erst dann ist eine optimale Nachführung möglich: Durch eine Bewegung des Bedienelementes wird eine Bewegung des Istwertes mit entsprechender Geschwindigkeit bewirkt. Rechtzeitig vor Erreichen der neuen Position muß diese Geschwindigkeit durch eine entgegengesetzte Bewegung des Bedienelementes in die Ausgangs-lage reduziert und zu Null geregelt werden.

Auf eine Beschreibung weiterer möglicher Transformationen kann hier verzichtet werden, da in den eigenen Untersuchungen nur Proportional- und Integraltransformationen sowie Zwischenstufen davon verwendet wurden.

1.2.3 Abhängige Variablen

Trackingaufgaben wurden im Laufe ihrer Entwicklung mit technisch immer aufwendigeren Apparaturen untersucht. Entsprechend verbesserten sich die Möglichkeiten der Datenerfassung und -auswertung. Bei psychologischen Untersuchungen mit Trackingaufgaben wurden durchgehend Fehlermaße erhoben; Leistungsverbesserungen schlugen sich in abnehmender Fehlerzahl nieder.

Bei ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen mit Trackingaufgaben wurden vornehmlich mathematische Methoden zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens des Menschen ("human transfer function") herangezogen (z.B. McROUR & KRENDEL, 1959).

Beide Ansätze, Fehleranalyse und Berechnung einer linearen Gleichung zur Bestimmung des menschlichen Übertragungsverhaltens, sollen im folgenden näher betrachtet werden.

Fehlermaße

Ein lange vorherrschendes Maß für die Leistung bei Trackingaufgaben waren die sogenannten "time on target"-Werte (TOT). Sie geben an, wie lange eine Vp ihre Abweichungen innerhalb bestimmter Grenzen hält. Man kann bei einer solchen Auswertung z.B. feststellen, daß eine Vp bei einer Trackingtätigkeit von einer Minute Dauer 46 Sekunden eine Abweichung von Ist- und Sollwert kleiner als 0,2 cm (oder entsprechende Voltzahl) hat, 11 Sekunden eine Abweichung zwischen 0,2 und 0,4 cm und die restlichen drei Sekunden eine Abweichung größer als 0,4 cm aufweist.

Es dürfte einleuchten, daß ein solches Maß keine differenziierten Aussagen über Verläufe zuläßt. Entsprechend wurde häufig Kritik an diesem Maß geübt (z.B. BAHRICK, FITTS & BRIGGS, 1957). Als Alternative bieten sich Fehlermaße an, die auf Abweichun-

gen von Soll- und Istwert basieren. Vier solche Fehlermaße sollen erläutert werden (vgl. POULTON, 1962):

- (1) Mittlerer konstanter Fehler: Er berechnet sich aus der Summe der Abweichungen unter Berücksichtigung des Vorzeichens, geteilt durch die Anzahl der Messungen ($\Sigma X/N$). Es handelt sich also um einen Fehlermittelwert, der die Richtung der Abweichungen berücksichtigt.
- (2) Mittlerer absoluter Fehler: Dieses Maß entspricht dem mittleren konstanten Fehler, jedoch wird die Richtung der Abweichung vernachlässigt und nur ihr mittlerer Betrag berechnet aus der Summe der absoluten Abweichungen, dividiert durch die Anzahl der Messungen ($\Sigma |X|/N$).
- (3) Mittlerer quadratischer Fehler: Die ersten beiden Fehlermaße gewichten alle Abweichungen von Soll- und Istwert gleich. Beim mittleren quadratischen Fehler werden dagegen größere Abweichungen durch Quadrierung stärker gewichtet; er berechnet sich als Wurzel aus der Summe der mittleren quadrierten Abweichung ($\sqrt{\Sigma X^2/N}$).
- (4) Standardabweichung: Es handelt sich hierbei um ein Maß für die Streuung der Abweichungen um ihren Mittelwert ($\sqrt{\Sigma (X-\bar{X})^2/N}$).

Folgende Überlegungen lassen es sinnvoll erscheinen, vier verschiedene Fehlermaße zu verwenden (vgl. POULTON, 1974, 33-38): Nehmen wir an, ein Vp bleibt bei einer Trackingaufgabe mit sinusförmiger Führungsgröße durchgehend um einen konstanten Betrag hinter der Führungsgröße zurück (Rückhalt). Eine zweite Vp bleibt abwechselnd hinter der Führungsgröße zurück, arbeitet ohne Abweichung und eilt ihr voraus (Vorhalt). Beide Vpn können gleiche mittlere absolute Fehler und mittlere quadrierte Fehler aufweisen, obwohl sich ihre Leistungen deutlich unterscheiden. Dieser Unterschied würde sich nur in den mittleren konstanten Fehlern und den Standardabweichungen niederschlagen: Als konstanter Fehler ergibt sich bei der ersten Vp ihr konstanter Rückhalt, bei der zweiten Vp ein Wert nahe Null. Die erste Vp hat eine Standardabweichung von Null, die zweite eine deutlich höhere.

Man muß also zwischen konstanten Fehlern (erste Vp) und variablen Fehlern (zweite Vp) differenzieren (vgl. auch die mit dem Artikel von SCHUTZ & ROY, 1973 aufgeflamnte Diskussion bezüglich konstantem und variablem Fehler: HENRY, 1974; SCHUTZ, 1974; HENRY, 1975; NEWELL, 1976).

Mittlere absolute und mittlere quadratische Fehlerwerte können eine solche Differenzierung nicht leisten, dennoch können auch sie von Vorteil sein: Bei Führungsgrößen, die ihre Richtung ändern, erhält das Vorzeichen des Fehlers bei jeder Richtungsänderung eine andere Bedeutung. Während ein negativer Fehler einmal einen Vorhalt bedeuten kann, so ist es nach Richtungsänderung der Führungsgröße ein Nachhalt. In diesem Fall erhält man bei Vernachlässigung der Abweichungsrichtung aussagekräftigere Fehlermaße. Auf dieses Problem werden wir später zurückkommen (Abschnitt 3.2.1).

Bestimmung des Übertragungsverhaltens

Dieser Methode liegt der Versuch zugrunde, menschliches Verhalten beim Bedienen von Fahrzeugen und Maschinen zu beschreiben. Der Mensch wird dabei als "black box" betrachtet, der auf bestimmte Eingangssignale reagiert. Das Prinzip der Übertragungsfunktion besteht darin, eine mathematische Beschreibung des Übergangs vom Eingang zum Ausgang vorzunehmen (BRIGGS, 1964). Auf die Nachteile dieser Methode bezüglich der Analyse von Lernverläufen wurde bereits eingegangen. Für die vorliegende Untersuchung ist von Bedeutung, daß als Folge dieses Ansatzes Auto- und Kreuzkorrelationstechniken eingesetzt wurden, weil diese es ermöglichen, zeitliche Verläufe auf einer anderen Ebene als bei der Fehleranalyse zu erkennen (MERRILL & BENNETT, 1956).

Im Gegensatz zur üblichen Korrelationsbestimmung in der Psychologie wird zwischen zwei Meßwertreihen nicht nur eine Korrelation berechnet, sondern mehrere. Dazu werden die beiden Meßwertreihen (bei der Autokorrelation sind es zwei identische Meßwertreihen einer Variable) gegeneinander verschoben und dann korreliert. Man erhält also für jede Verschiebung eine

Korrelation. Die Veränderung dieser Korrelationen mit zunehmender Zeitverschiebung wird als Auto- bzw. Kreuzkorrelationsfunktion bezeichnet. Aus solchen Korrelationsfunktionen lassen sich Rückschlüsse auf zeitliche Veränderungen beim gemessenen Prozeß ableiten (z.B. BAHRICK & NOBLE, 1966).

Die Autokorrelationsfunktion zeigt vor allem Periodizitäten in der zugrundeliegenden Reihe von Daten. Aus der Kreuzkorrelationsfunktion einer Trackingleistung lassen sich folgende Indizes ableiten:

- (a) Korrelation bei einer Zeitverschiebung von Null: Dies ist ein Maß für die absolute Übereinstimmung von Führungsgröße und Reaktion der Vp; sie zeigt an, wie gut beide Signale übereinstimmen.
- (b) Maximale Korrelation: Wenn eine Korrelation ohne Zeitverschiebung nicht die maximale ist, so bedeutet dies, daß das Signal der Vp gegenüber der Führungsgröße verschoben ist, die Vp bleibt entweder hinter der Führungsgröße zurück (Maximum bei negativer Zeitverschiebung) oder eilt ihr voraus (Maximum bei positiver Zeitverschiebung).
- (c) Ausmaß der Zeitverschiebung bis zur maximalen Korrelation (b): Dieser Wert gibt an, um wieviel die Vp der Führungsgröße vorseilt oder hinter ihr zurückbleibt. Dieser Wert entspricht der Reaktionszeit bei einer kontinuierlichen Tätigkeit.

Veränderungen dieser drei Indizes deuten auf entsprechende Änderungen der Tätigkeitsstruktur hin und können somit Indikatoren für einen Lernprozeß sein.

1.2.4 Zusammenfassung

Tracking ist ein Sammelbegriff für Aufgaben, bei denen einer Marke, die sich nach einer bestimmten Funktion in Abhängigkeit von der Zeit verändert (Führungsgröße), mit einer anderen Marke, die über ein sogenanntes Bedienelement von der Vp gesteuert wird, gefolgt werden soll. Aufgabe der Vp ist es, möglichst keine Abweichungen zwischen beiden auftreten zu lassen.

Die wesentlichen Formen von Trackinganordnungen sind Folgetracking und kompensatorisches Tracking. Beide Formen unterscheiden sich nur hinsichtlich der Anzeige für die Vp: Bei Folgetracking werden Soll- und Istwert getrennt angezeigt, entstehende Abweichungen können leicht Veränderungen der Führungsgröße oder des Bediensignals zugeordnet werden. Beim kompensatorischen Tracking wird die Differenz zwischen Soll- und Istwert dargestellt. Die Vp muß diese Differenz kompensieren, ohne jeweils erkennen zu können, ob eine auftretende Abweichung auf ihr Bediensignal oder eine Änderung der Führungsgröße zurückgeht.

Unabhängige Variablen bei Trackinganordnungen sind die Art der Anzeige, des Verlaufs der Führungsgröße, des Bedienelementes und die Transformation der Regelstrecke. Abhängige Variable ist die Leistung; sie kann durch verschiedene Fehlermaße oder Kennwerte der Kreuzkorrelationsfunktion ermittelt werden.

In den folgenden Abschnitten soll dargestellt werden, wie mit Trackinganordnungen sensomotorisches Lernen analysiert werden kann und welche Art der Trackingaufgabe dazu geeignet ist.

1.3 Lernen bei Trackingaufgaben

Eine Vp, die zum ersten Mal mit einer Trackingaufgabe konfrontiert wird, benutzt die ersten Durchgänge, um sich allgemein mit der Situation vertraut zu machen. Es folgt eine Phase, in der die Bewegungsstruktur den Erfordernissen angepaßt wird, und danach lernt die Vp, den zeitlichen Verlauf der Führungsgröße vorherzusagen.

Diese Schritte wurden von SLACK (1953) bei einer Trackingaufgabe mit Sprungfunktionen festgestellt. Prinzipiell ähnliches gilt auch für Trackingaufgaben mit kontinuierlicher Führungsgröße. Die Vp muß ein Bediensignal erzeugen, das unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Regelstrecke einen der Führungsgröße entsprechenden zeitlichen Verlauf des Istwertes ergibt. Der Lernprozeß setzt sich also vor allem aus dem Erkennen des zeitlichen Verlaufs der Führungsgröße und der

Kompensation der durch die Regelstrecke vorgenommenen Transformation des Bediensignals in den Istwert zusammen.

1.3.1 Veränderung der Schwierigkeit

Setzt man eine Trackingaufgabe zur Untersuchung eines Lernprozesses ein, muß man die Schwierigkeit dieser Komponenten so wählen, daß ein Lernprozeß überhaupt stattfinden kann.

Betrachten wir zunächst die Führungsgröße. Wichtigster Aspekt ist der Grad der Regelmäßigkeit des zeitlichen Verlaufes. Nur eine regelmäßige Führungsgröße kann gelernt, d.h. ihr zeitlicher Verlauf kann vorhergesagt werden. Das Kontinuum der Regelmäßigkeit und damit Schwierigkeit reicht von einer über die Zeit konstanten Führungsgröße, die exakt vorhergesagt werden kann, bis zu einer aus sogenanntem "weißen Rauschen" bestehenden Führungsgröße, die überhaupt nicht vorhergesagt werden kann. Als häufig verwendete Zwischenformen wurden bereits einfache Sinusschwingungen und Überlagerungen mehrerer Sinusschwingungen erwähnt. Beide Formen sind periodisch, d. h. sie wiederholen sich nach einer bestimmten Dauer.

Bei der Regelstrecke reicht das Kontinuum der Schwierigkeit von einer proportionalen Transformation bis zu völlig unregelmäßigen zeitlichen und/oder räumlichen Transformationen des Bediensignals. Auf praktisch verwendbare Transformationen wurde bereits im Abschnitt 1.2.2 eingegangen.

Ein letzter Punkt bezüglich der Schwierigkeit von Trackingaufgaben betrifft die Anzeige. Es wurde bereits dargestellt, daß beim Folgetracking im Gegensatz zum kompensatorischen Tracking Führungsgröße und Istwert getrennt angezeigt werden. Zeitlicher Verlauf der Führungsgröße und Transformation der Regelstrecke können also beim Folgetracking getrennt voneinander gelernt werden, was beim kompensatorischen Tracking nicht der Fall ist. Will man die beiden Lernprozesse trennen, so ist also eine Folgetrackinganordnung vorzuziehen.

1.3.2 Nebentätigkeiten

Laboruntersuchungen sind in ihren Umgebungsbedingungen relativ eingeschränkt. In vergleichbaren praktischen Situationen treten jedoch in der Regel zusätzliche Faktoren auf, die man allgemein als "Stressoren" bezeichnen kann. Damit ist gemeint, daß solche Umgebungsvariablen, die in der Laborsituation im Hinblick auf eine isolierte Variation der Versuchsbedingungen ausgeschlossen werden, belastend wirken und höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Menschen stellen.

Belastende Faktoren sind objektive Gegebenheiten der Umwelt (z.B. Lärm, Temperatur u.ä.), die auf den Menschen einwirken. Die individuellen Auswirkungen dieser Belastungen werden als Beanspruchung bezeichnet (vgl. HOYOS, 1974, 55). Das Individuum ist beansprucht, weil es zur adäquaten Bewältigung der Aufgabe unter belastenden Bedingungen zusätzliche Energie aufwenden muß. Die Auswirkung belastender Faktoren auf die menschliche Leistung ist hinreichend untersucht (z.B. HETTINGER, KAMINSKY & SCHMALE, 1976); es wurde jedoch selten danach gefragt, wie sich solche, nicht aufgabenspezifische Einflüsse und die daraus resultierende Beanspruchung auf einen Lernprozeß auswirken.

Beanspruchung ist ein hypothetisches Konstrukt, da nicht direkt meßbar. Sie kann nur aus Leistungsbeeinträchtigungen erschlossen oder durch Befragung ermittelt werden. Arbeitswissenschaftler und Psychologen haben verschiedene Methoden zur Erfassung von Beanspruchung entwickelt (z.B. BARTENWERFER, 1960). Einen zusammenfassenden Überblick über solche Methoden geben JAHNS (1973) und JOHANNSEN (1976). Die wichtigste Methode basiert auf der bereits dargestellten Erkenntnis, daß die menschliche Informationsbearbeitungskapazität begrenzt ist. Die Beanspruchung ist umso größer, je stärker diese Kapazität ausgelastet ist. Zur Bestimmung der bei einer Tätigkeit verbleibenden Restkapazität (spare mental capacity) werden zusätzliche Aufgaben vorgegeben, die ebenfalls eine Aufnahme und Verarbeitung von Informationen erfordern (BORNEMANN, 1942). Solche Nebentätigkeiten (gleichbedeutende Begriffe sind: "Nebentätigkeiten,

Zusatztätigkeiten, Doppelarbeitsmethode oder auch im Englischen secondary tasks, loading tasks, side tasks oder subsidiary tasks"; JOHANNSEN, 1976, 46) waren zum Beispiel:

- Tappingaufgaben (MICHON, 1964, 1966; MICHON & vanDOORNE, 1965)
- Manuelle Geschicklichkeitsaufgaben (SCHOUTEN, KALSBECK & LEOPOLD, 1962; KALSBECK, 1964)
- Rechenaufgaben (BAHRICK, NOBLE & FITTS, 1954; GARVEY, 1960; McLEOD, 1973)
- Zahlenreihen ergänzen (TRUMBO, NOBLE & SWINK, 1967; NOBLE, TRUMBO & FOWLER, 1967)
- Erkennen und Behalten von Signalfrequenzen (TRUMBO & MILONE, 1971)
- unterschiedliche Reaktionsaufgaben (BAHRICK & SHELLY, 1958; GARVEY & TAYLOR, 1959; GRIEW, 1959; GARVEY, 1960; BROWN & POULTON, 1961; BROWN, 1962; ADAMS & CHAMBERS, 1962; SMITH, 1963; BROWN, 1965; HUDDLESTON & WILSON, 1971; TRUMBO & NOBLE, 1972)
- eine zweite Trackingaufgabe (GARVEY & TAYLOR, 1959; GARVEY & HENSON, 1959; MARTIN, 1970; JOHNSTON et al., 1970).

Diese Aufzählung ist nicht vollständig, gibt jedoch die wesentlichen Formen von Nebentätigkeiten wieder. Am häufigsten wurden (Wahl-)Reaktionsaufgaben verwendet.

Die Güte der Leistung in der Nebentätigkeit kann als Maß für die bei der Durchführung der Hauptaufgabe nicht benötigte Restkapazität betrachtet werden. Mehr oder weniger deutlich zeigte sich jedoch in den genannten Untersuchungen, daß die Leistung in der Haupttätigkeit bei Einführung der Nebentätigkeit absank. GARVEY (1960, 375) formuliert das beispielsweise so: "The addition of secondary tasks with highly trained Ss produces a regression in performance to a level of complexity analogous to that found at the early stages of training".

Die Vpn setzen also mehr als nur ihre freie Restkapazität zur Bewältigung der Nebentätigkeit ein. In welchem Ausmaß dies geschieht, hängt wesentlich davon ab, welcher von beiden Tätigkeiten man durch die Instruktion mehr Gewicht verleiht.

Außerdem spielt die Art der Wahrnehmung eine Rolle. Informationen über die Trackingaufgabe werden visuell wahrgenommen. Erfordert die Nebentätigkeit ebenfalls eine visuelle Reiz- erfassung, so kann der Abfall der Trackingleistung darauf zurückgehen, daß die Beobachtung der Trackinganzeige unter- brochen werden muß, um die Signale der Nebentätigkeit zu er- kennen. Es empfiehlt sich daher, bei visuellen Trackingauf- gaben Nebentätigkeiten zu verwenden, die eine auditive Reiz- erfassung erfordern. Nur dann kann man sicher sein, daß ein Leistungsabfall in der Trackingaufgabe auf eine Überforderung der Kanalkapazität zurückgeht.

Auditive Nebentätigkeiten geeigneter Schwierigkeit können also zu einem Absinken der Trackingleistung führen, weil sie be- lastend im Sinne einer Überforderung der Kanalkapazität wir- ken. Eine Nebentätigkeit mit konstanter Schwierigkeit müßte demnach am Anfang eines sensomotorischen Lernprozesses stär- ker leistungsbeeinträchtigend wirken als bei fortgeschritte- nem Lernprozeß, da dann im Sinne einer Automatisierung oder Programmierung von Bewegungsabläufen mehr freie Kanalkapazität vorhanden sein müßte.

Ein Problem besteht darin, die Schwierigkeit einer Nebentätig- keit und damit ihre belastende Wirkung für verschiedene Vpn gleich zu halten, um interindividuelle Vergleiche anstellen zu können. Gelingt dies, so kann man nicht nur den Lernprozeß stören, sondern auch Lernfortschritte diagnostizieren. Wir werden darauf im Abschnitt 3.1.2 zurückkommen.

1.3.3 Ausblenden der Rückmeldung

Ein Autofahrer, der jeden Tag den gleichen Weg zu seiner Ar- beitsstelle fährt, kann die Strecke "im Schlaf" fahren. Der umgangssprachliche Ausdruck deutet an, daß der Streckenver- lauf im Gedächtnis gespeichert ist und bei eingeschränkter optischer Wahrnehmung (z.B. Regen) fast so sicher gefahren werden kann wie bei günstiger Sicht.

Das Lernen eines solchen Streckenverlaufes wird dadurch er-

leichtert, daß der Verlauf im voraus wahrgenommen werden kann (Voranzeige). Bei einer Folgetrackinganordnung ohne Voranzeige findet ein ähnlicher Lernprozeß statt. Nach einer ausreichenden Übungszeit erwirbt eine Vp gute Vorstellungen über den zeitlichen Verlauf.

Man kann das überprüfen, indem man die Vp für kurze Zeit mit geschlossenen Augen nachführen läßt (z.B. POULTON, 1957a) oder die Führungsgröße ausblendet, so daß sie für die Vp nicht mehr sichtbar ist (z.B. GOTTS-DANKER, 1952a, 1952b, 1955, 1956; POULTON, 1957b; McLEOD, 1972). Es zeigte sich, daß bei einfachen Sinusschwingungen während einer Ausblendung der Führungsgröße bis zu fünf Sekunden keine wesentliche Verschlechterung der Leistung eintrat, d.h. der Verlauf des Istwertes entsprach dem Verlauf der nicht mehr sichtbaren Führungsgröße. Bei aus mehreren Sinusschwingungen zusammengesetzten Führungsgrößen orientierten sich die Vpn an der mittleren Geschwindigkeit und Beschleunigung der Führungsgröße und setzten ihre Bewegung entsprechend fort. Waren die Veränderungen von Geschwindigkeit und Beschleunigung jedoch zu häufig und zu groß (bei hohen Frequenzen), so hielten manche Vpn ihre Bewegung an, bis die Führungsgröße wieder sichtbar war (GOTTS-DANKER, 1956).

Eine Ausblendung der Führungsgröße bietet also die Möglichkeit, das Erlernen des zeitlichen Verlaufes der Führungsgröße zu überprüfen (Erfahrungsantizipation im Sinne von POULTON, 1952a). Eine Ausblendung des Istwertes würde demgegenüber erkennen lassen, wie gut eine Vp die Transformation ihres Bediensignals durch die Regelstrecke beherrscht. Darüber hinaus könnte man erkennen, ob das Verhalten der Vp primär aus Korrekturen der Abweichung von Soll- und Istwert besteht oder ob bereits ein Bewegungsprogramm (Rahmenkoordination) ausgebildet ist, das dem Verlauf der Führungsgröße entspricht und nur bei auftretenden Abweichungen korrigiert wird. Im ersten Fall fehlt bei einer Ausblendung des Istwertes die Basis für das Verhalten der Vp, sie wird entweder ihre Bewegung stoppen (wie bei GOTTS-DANKER) oder unregelmäßiger werden. Ist jedoch

bereits ein Bewegungsprogramm ausgebildet, so kann die Bewegung kontinuierlich fortgesetzt werden.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Korrektur von Fehlern eine wesentliche Variable beim Erwerb sensomotorischer Fertigkeiten ist. Mit zunehmender Fertigkeit spielt die Fehlerkorrektur eine immer geringere Rolle (Übergang vom verbalmotorischen zum motorischen Stadium nach ADAMS, 1971 bzw. Ausbildung eines Schemas nach PEW, 1974 und SCHMIDT, 1975). Durch Ausblenden des Istwertes kann dieser Prozeß besser überprüft werden als durch Ausblendung der Führungsgröße, da man bei letzterem nur erkennen kann, ob und wie gut der zeitliche Verlauf der Führungsgröße vorhergesagt werden kann (vgl. auch die Unterscheidung von "open" und "closed" skills bei POULTON, 1957c).

1.3.4 Zusammenfassung

Bei Folgetrackinganordnungen mit kontinuierlicher Führungsgröße müssen der zeitliche Verlauf der Führungsgröße und die Transformation des Bediensignals durch die Regelstrecke gelernt werden, bevor eine Verfeinerung der Bewegungsstruktur eintreten kann.

Die Schwierigkeit einer solchen Trackingaufgabe hängt von der Regelmäßigkeit der Führungsgröße und dem Ausmaß an zeitlicher und räumlicher Transformation ab. Geeignete Schwierigkeitsabstufungen der Führungsgröße sind einfache Sinusschwingungen bis zu einer Frequenz von etwa zwei Hz und Überlagerungen mehrerer Sinusschwingungen dieses Frequenzbereiches. Als Transformationen sind Proportional- und Integraltransformationen sowie Zwischenstufen mit proportionalen und integralen Anteilen geeignet.

Eine zusätzliche Belastung der Kanalkapazität durch eine Nebentätigkeit eignet sich zur Diagnose des Lernfortschrittes und zur Störung früherer Phasen des Lernprozesses.

Eine kurzfristige Ausblendung des Istwertes ermöglicht es,

den Grad der Automatisierung des Bewegungsablaufes festzustellen. Man kann erkennen, ob bereits ein Bewegungsprogramm entwickelt wurde, das ein Nachführen ohne kontinuierliche optische Rückmeldung ermöglicht.

1.4 Zusammenfassung und Fragestellungen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit sensomotorischen Handlungen des Menschen, speziell mit sensomotorischen Komponenten zielgerichteten Handelns. Unter zielgerichtetem Handeln wird dabei in erster Linie der Gebrauch von Werkzeugen oder Maschinen im weitesten Sinne verstanden. Andere Aspekte, z.B. Ausdrucksbewegungen oder Lokomotion, werden nicht behandelt.

An zielgerichtetes Verhalten kann ein Gütemaßstab angelegt werden; das Resultat der Handlung kann der geforderten Leistung mehr oder weniger gut entsprechen. Unterschiede in der Leistungsgüte verschiedener Personen und die Tatsache, daß eine Person ihre Leistung bei wiederholter Ausführung in der Regel verbessert, deuten darauf hin, daß zielgerichtetes Handeln erlernt wird. Solche Lernprozesse sind bisher kaum analysiert worden; in den zahlreichen, an praktischen Problemen orientierten Untersuchungen stand der Leistungsaspekt im Vordergrund, d.h. man untersuchte in erster Linie die Struktur sensomotorischer Handlungen bei solchen Personen, die im Lernprozeß weit fortgeschritten waren, über sog. Fertigkeiten verfügten.

Diese Arbeiten lieferten eine Reihe von Befunden über die sensomotorische Struktur von Fertigkeiten. Ansätze zur theoretischen Formulierung von Gesetzmäßigkeiten über den zu einer Fertigkeit führenden Lernprozeß interpretieren häufig solche Strukturbeschreibungen, ohne dabei wirklich Aussagen über den Lernprozeß zu machen, die empirisch oder experimentell prüfbar wären.

Zielgerichtetes sensomotorisches Verhalten umfaßt die Aufnahme sensorischer Informationen, deren Verarbeitung und Umsetzung in motorische Aktionen. Einschlägige theoretische Ansätze sind

daher vor allem solche, die von einer systemtheoretischen Betrachtungsweise ausgehen. Der Mensch wird dabei als Element eines Mensch-Maschine Systems betrachtet; er vergleicht Rückmeldungen über den Zustand des Systems mit dem Sollzustand und greift bei Abweichungen korrigierend ein. Bei der Beschreibung einiger solcher Ansätze wurde zu zeigen versucht, daß sie sich von eher phänomenologischen Beschreibungen zwar terminologisch unterscheiden, inhaltlich aber kaum weiterführen. Eine entscheidende Einschränkung dieser Theorien besteht ferner darin, daß sie auf einfache, zeitlich und räumlich begrenzte Bewegungen ("graded responses") beschränkt sind. Komplexere und über einen längeren Zeitraum erstreckte sensorische Koordinationsleistungen bleiben ausgeklammert.

In der vorliegenden Arbeit soll der zu einer solchen komplexen Fertigkeit führende Lernprozeß analysiert werden. Das generelle Anliegen läßt sich also folgendermaßen formulieren:

- (1) Welche Veränderungen lassen sich beim Erlernen einer komplexen sensomotorischen Tätigkeit beobachten?

Ein gut geeignetes experimentelles Paradigma eines sensomotorischen Lernprozesses stellen Trackinganordnungen dar. Um zu Aussagen über Veränderungen der Tätigkeitsstruktur während des Lernverlaufes zu gelangen, bieten sich zwei Klassen von abhändigen Variablen an: Fehlermaße und Kennwerte von Korrelationsfunktionen. Der zweite Fragenkomplex der Arbeit betrifft den Vergleich dieser Indikatoren:

- (2) In welchem Maße sind Fehlerwerte und Korrelationsfunktionen geeignet, Aussagen über Lernprozesse zu machen?

Ein Aspekt von sensomotorischem Lernen ist die sogenannte "Automatisierung" von Bewegungsabläufen. Mit zunehmendem Lernen nimmt die Bedeutung externer Rückmeldungen über die Qualität einer Bewegung ab; damit wird Informationsverarbeitungs-kapazität des Menschen frei.

Eine Möglichkeit zur Erfassung freier Informationsverarbei-

tungskapazität bieten Nebentätigkeiten. Sie können auch verwendet werden, um Belastungen während des Lernprozesses einzuführen, da ein Teil der Kapazität für diese Nebentätigkeiten eingesetzt werden muß. Die beiden letzten Fragestellungen der Arbeit beziehen sich auf diesen Aspekt:

- (3) Ändert sich der Verlauf des Lernprozesses, wenn die Informationsverarbeitungskapazität des Lernenden zu verschiedenen Zeitpunkten des Lernprozesses beeinträchtigt wird? und
- (4) Führen Störungen des Lernprozesses durch solche Belastungen zu unterschiedlichen "Endzuständen" beim Lernen?

Die Einführung informatorischer Belastungen als Mittel zur Beeinflussung des Lernprozesses hat auch praktische Bedeutung, denn der Erwerb sensomotorischer Fertigkeiten erfolgt in praktischen Situationen, z.B. bei industriellen Anlernprozessen, unter belastenden Umgebungsbedingungen, z.B. Lärm. Die Ergebnisse dieser Arbeit können daher für die praktische Gestaltung solcher Lernprozesse von Bedeutung sein.

Wir haben versucht, deutlich zu machen, daß die Arbeit in erster Linie erkundenden Charakter hat; spezifische Hypothesen über Lernstadien oder Veränderungen der abhängigen Variablen sind wegen der eingeschränkten Bedeutung vorliegender Ansätze für komplexe sensomotorische Koordinationsleistungen kaum möglich.

1.5 Vorbemerkungen zu den experimentellen Untersuchungen

Erste Untersuchungen zum Einfluß informatorischer Belastungen mittels Reaktionsaufgaben zeigten, daß bei einer relativ einfachen Trackingaufgabe (sinusförmige Führungsgröße und proportionale Transformation des Bediensignals) keine eindeutige Auswirkung der Belastung auf die Trackingleistung auftrat (HERLITZ & WITT, 1975). Bei einer anderen Tätigkeit (Nachfahren eines Kreises von 50 cm Durchmesser) ergaben sich je-

doch Beeinträchtigungen der Leistung (BECKMANN & SCHIPKE, 1975). Diese unter Anleitung des Verfassers entstandenen Semesterarbeiten konnten jedoch keine Aufschlüsse über die Veränderung der Tätigkeitsstrukturen liefern. Zur Prüfung der Fragestellungen wird daher auf zwei Untersuchungen zurückgegriffen, die mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt wurden.

Die erste Untersuchung, die von K. T. KALVERAM, F. MERZ und D. ALBERT am Fachbereich Psychologie der Philipps-Universität Marburg geplant und vom Verfasser durchgeführt wurde, überprüfte den Einfluß verschiedener Transformationen der Motorik auf die Leistungen bei einer Folgetrackingaufgabe.

Die zweite Untersuchung wurde vom Verfasser geplant. Wegen Verzögerungen bei der Bewilligung der finanziellen Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ergab es sich, daß der Aufbau der Versuchsanordnung und die Versuchsdurchführung erst möglich wurden, nachdem der Verfasser bereits am Psychologischen Institut der Universität Tübingen angestellt war. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung wurden daher von H. HEUER geleitet. Bei beiden Untersuchungen wurden wesentliche Teile der Versuchssteuerung von K. T. KALVERAM vorbereitet.

Ein Teil der zweiten Untersuchung war so angelegt, daß die Daten zur Prüfung der Fragestellungen dieser Arbeit herangezogen werden konnten. Alle Auswertungen wurden von Verfasser am Psychologischen Institut der Universität Tübingen vorgenommen; das gleiche gilt für die graphischen Darstellungen.

2. ERSTE UNTERSUCHUNG

Ziel dieser Untersuchung war es, die Auswirkung verschiedener Transformationen des Bediensignals auf die Leistung bei einer Folgetrackingaufgabe zu untersuchen. Die dabei gemachten Erfahrungen und die Ergebnisse lieferten wichtige Hinweise für die Entwicklung eines Versuchsplanes zur Überprüfung der Fragestellungen dieser Arbeit in der zweiten Untersuchung. Daher sollen die wesentlichen Merkmale dieser Untersuchung und ihre Ergebnisse kurz dargestellt werden. Auf eine statistische Absicherung der Ergebnisse wird verzichtet.

2.1 Methode

2.1.1 Trackinganordnung

Es wurde eine eindimensionale Folgetrackinganordnung ohne Voranzeige verwendet. Führungsgröße und Istwert wurden als senkrechter Strich bzw. Kreis auf einem Oszillographenschirm abgebildet.

Als Bedienelement diente ein Hebel, der durch Drehung des rechten Unterarmes in horizontaler Richtung bewegt wurde. Unter dem Drehpunkt des Hebels war ein Potentiometer angebracht, das eine der Hebelstellung proportionale Spannung als Bediensignal lieferte. Der Hebel drehte sich auf einem Kugellager, so daß nur der minimale Widerstand des Potentiometers und des Kugellagers zu überwinden war.

Vier Transformationen des Bediensignals wurden untersucht: Eine Proportional-Transformation (P), eine Integral-Transformation (I) sowie zwei Proportional-Integral-Transformationen (PI 0,5 bzw. PI 0,8). Die Verstärkung des Proportionalgliedes wurde so gewählt, daß der Istwert bei einer Hebelbewegung von etwa plus/minus 40 Grad aus der Nulllage den jeweiligen Rand des Oszillographenschirmes erreichte. Die Zeitkonstante des Integralgliedes betrug etwa $2,9 \text{ (}^\circ/\text{cm)} \cdot (\text{sec})$. Zur Erreichung einer Geschwindigkeit von 1 cm/sec war eine Drehung des Hebels um ca. drei Grad aus der Nulllage erforder-

lich. Bei den Proportional-Integral-Transformationen wird durch eine Veränderung der Hebelposition eine Positionsverschiebung des Istwertes erreicht, wobei der Istwert sich gleichzeitig mit einer dem Integralanteil entsprechenden Geschwindigkeit weiterbewegt. Bei den beiden letzten Transformationen wurden die Proportional- und Integralkomponente, d. h. die am Potentiometer abgegriffene Spannung und deren integrierter Betrag, im Verhältnis 0,5 P zu 0,5 I (PI 0,5) bzw. 0,2 P zu 0,8 I (PI 0,8) analog addiert.

Folgende zwei Führungsgrößen wurden verwendet:

- (a) eine Sinusschwingung von 0,51 Hz und
- (b) eine aus fünf überlagerten Sinusschwingungen bestehende Führungsgröße mit Einzelfrequenzen von 0,11 Hz, 0,27 Hz, 0,31 Hz, 0,68 Hz und 0,91 Hz (Abbildungen 2.1 und 2.2).

Die maximalen Amplituden beider Führungsgrößen waren einander angeglichen.

Jede Führungsgröße wurde mit jeder Transformation kombiniert; es ergaben sich daher die in Tabelle 2.1 dargestellten acht Versuchsbedingungen.

=====

Tabelle 2.1

Die acht Versuchsbedingungen der ersten Untersuchung.

Bedingung	Führungsgröße	Transformation
1	Sinus 0,51 Hz	Proportional
2	Sinus 0,51 Hz	Integral
3	Sinus 0,51 Hz	Proportional-Integral (PI 0,5)
4	Sinus 0,51 Hz	Proportional-Integral (PI 0,8)
5	überlagerte Sinus	Proportional
6	überlagerte Sinus	Integral
7	überlagerte Sinus	Proportional-Integral (PI 0,5)
8	überlagerte Sinus	Proportional-Integral (PI 0,8)

=====

2.1.2 Versuchsaufbau

Der Versuch erstreckte sich für jede Vb über zehn Sitzungen von etwa 50 Minuten Dauer. In der ersten Sitzung wurden die

Von mit der Versuchssituation und der Transformation ihres Bediensignals durch die Regelstrecke vertraut gemacht. Anschließend erfolgten 20 Durchgänge Tracking. Die folgenden Sitzungen bestanden jeweils aus 40 Durchgängen Tracking. Nach zehn Durchgängen wurde eine Pause von zehn Sekunden gemacht.

Die einzelnen Durchgänge dauerten 40 Sekunden; es folgte eine Pause von zehn Sekunden, während der die Von eine Rückmeldung über ihre Trackingleistung erhielten (Anzeige der aufintegrierten Regelabweichung). Die ersten zehn Sekunden eines Durchgangs dienten als Eingewöhnungsphase; die anschließenden 30 Sekunden wurden bei jedem geradzahligem (also jedem zweiten) Durchgang nach einer analog-digital-Transformation auf einem Digital-Magnetband aufgezeichnet, so daß pro Versuchssitzung 20 Abschnitte von je 30 Sekunden Dauer registriert wurden. Bei der ersten Sitzung waren es entsprechend zehn solcher Abschnitte.

Mit Ausnahme der Durchgänge 6, 16, 26 und 36 wurde jeweils zu Beginn der Registrierphase der Istwert für vier Sekunden ausgeblendet; dies wurde durch ein optisches Signal (Lämpchen) angekündigt.

Die Registrierphase setzte jeweils mit einem nulldurchgang der Führungsgröße ein, um vergleichbare Bedingungen zu haben. Die registrierten Perioden der einfachen Sinusschwingung sind daher für alle Durchgänge identisch. Die aus mehreren überlagerten Sinusschwingungen bestehende, unregelmäßige Führungsgröße war für die Dauer einer Sitzung auf einem Analog-Magnetband aufgezeichnet. Während einer Versuchssitzung lief dieses Band kontinuierlich weiter. Da der Versuchsbeginn nicht mit dem Band synchronisiert werden konnte, waren die registrierten Abschnitte dieser Führungsgröße nicht identisch. Zur Charakterisierung der unregelmäßigen Führungsgröße sind daher in den Abbildungen 2.1 und 2.2 Ausschnitte aus zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen dargestellt, die einen Eindruck vom Grad der (Un)Regelmäßigkeit vermitteln sollen. Der Beginn der Registrierphase erfolgte wie bei der einfachen Sinusschwingung jeweils mit einem nulldurchgang.

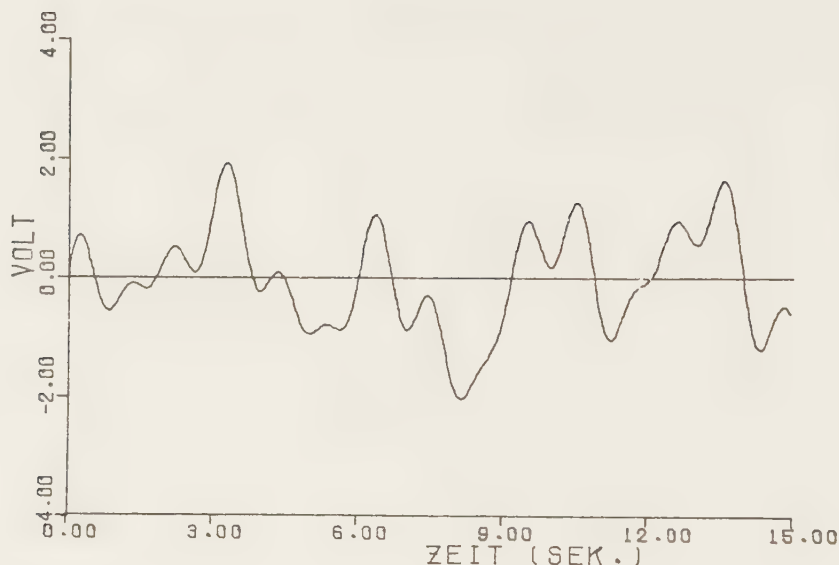


Abbildung 2.1

Ein Ausschnitt der unregelmäßigen Führungsgröße (fünf überlagerte Sinusschwingungen).

2.1.3 Datenaufzeichnung und Auswertung

Neben anderen Variablen, die in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden, wurden die Verläufe von Führungsgröße und Istwert analog-digital transformiert und auf Magnetband aufgezeichnet. Dies geschah mit einer Frequenz von 50 Hz, d. h. pro Sekunde wurden 50 Datenpunkte erfaßt.

Aus diesen Daten wurden Kreuzkorrelationsfunktionen für Abschnitte von jeweils vier Sekunden Tracking berechnet, und zwar einmal für die ersten vier aufgezeichneten Sekunden (dies entspricht bei den betreffenden Durchgängen der Zeit ohne Rückmeldung über den Istwert) und außerdem von der elften bis zur vierzehnten Sekunde, wo die Rückmeldung immer vorhanden war. Alle Korrelationen basieren auf 200 Meßwerten (vier Sekunden). Es wurden Korrelationen bis zu einer Zeit-

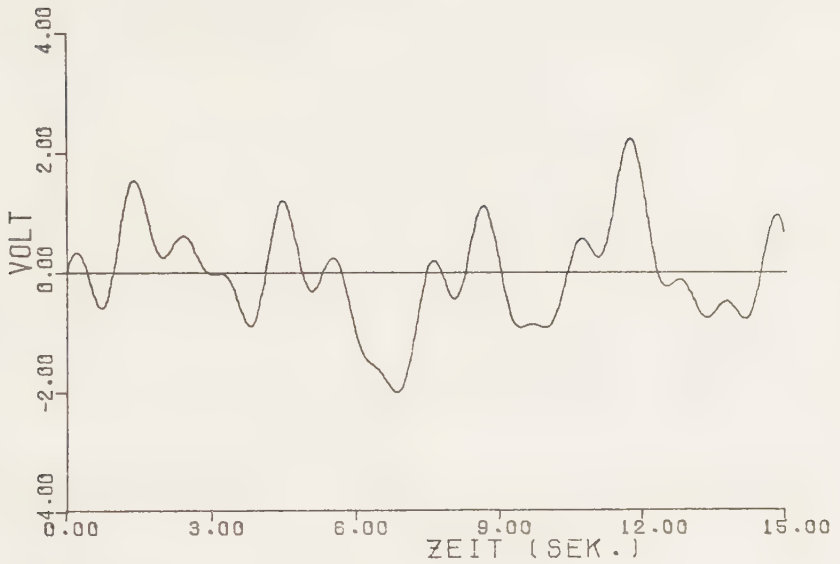


Abbildung 2.2

Ein weiterer Ausschnitt der unregelmäßigen Führungsgröße.

verschiebung von plus/minus einer Sekunde berechnet.

Pro Versuchsbedingung nahmen neun Versuchspersonen teil. Es handelte sich um männliche Schüler und Studenten im Alter zwischen 16 und 31 Jahren, die für ihre Teilnahme bezahlt wurden.

2.2 Ergebnisse

Bei der Darstellung der Ergebnisse beschränken wir uns auf die Kreuzkorrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert ohne Zeitverschiebung sowie die Zeitverschiebungen, bei denen die Kreuzkorrelationsfunktionen ihr erstes Maximum erreichen. Diese Werte sind jeweils pro V_0 und Sitzung gemittelt. Es stellte sich heraus, daß wegen einer ungenauen Justierung

des Aufnahmekonfes beim aufzeichnenden Magnetbandgerät Teile der Daten nicht ordnungsgemäß gelesen und ausgewertet werden konnten. Daher konnten wir nur von sieben von pro Bedingung hinreichend vollständige Daten gewinnen.

2.2.1 Korrelationen

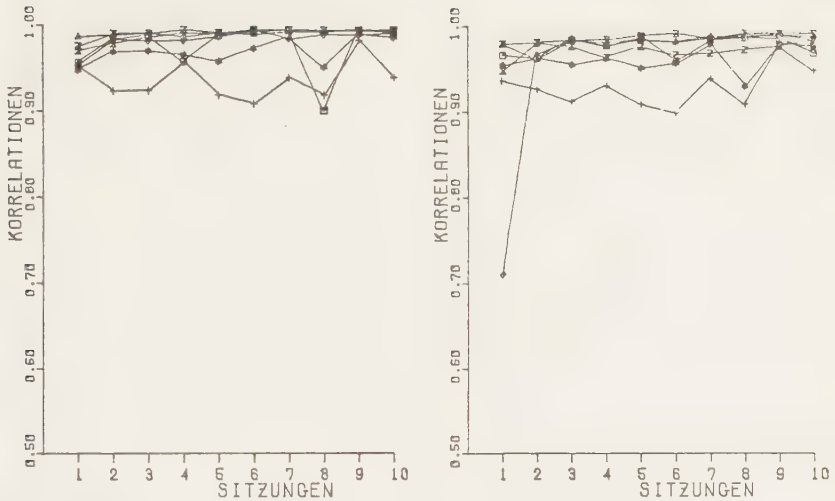
Die Abbildungen 2.3 bis 2.10 enthalten die Werte für die acht Versuchsbedingungen. Die jeweils linken Darstellungen zeigen die Korrelationen bei vorhandener Rückmeldung, die jeweils rechten Darstellungen die Korrelationen für die vier Sekunden ohne Rückmeldung. Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Führungsgrößen werden jeweils die Ergebnisse beider Führungsgrößen bei einer Transformation gegenübergestellt.

Die verschiedenen Versuchsbedingungen machen unterschiedliche Einteilungen der Ordinate erforderlich; für die Korrelationen einer Versuchsbedingung mit bzw. ohne Rückmeldung ist die Einteilung gleich.

2.2.1.1 Proportional-Transformation (Abbildungen 2.3 und 2.4)

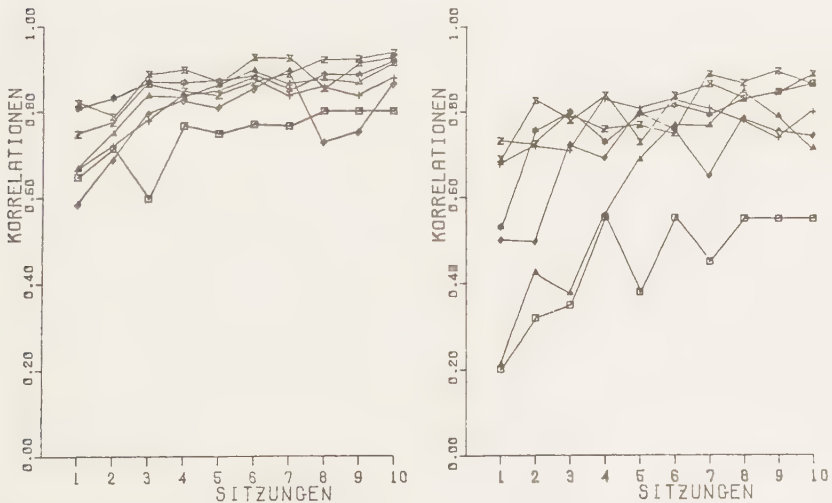
Diese Transformation war für die Vpn bei der sinusförmigen Führungsgröße einfach. Die Anfangsleistungen sind bereits sehr hoch; von der ersten zur zweiten Sitzung ist ein Anstieg zu beobachten, aber anschließend sind keine wesentlichen Verbesserungen mehr möglich. Auch ohne Rückmeldung ist diese Kombination gut zu beherrschen, allerdings treten deutlichere Unterschiede zwischen den Vpn zutage. Zwei Vpn liegen mit ihren Werten deutlich unter den anderen fünf. Selbst bei dieser einfachen Anordnung sind sie nicht in der Lage, die geforderte Bewegungsfolge herzustellen. Möglicherweise schlagen diese Vpn auch eine andere Strategie ein als die übrigen Vpn. Darüber sind auf dieser Ebene der Datenanalyse keine Aussagen möglich.

Die aus mehreren überlagerten Sinusschwingungen bestehende Führungsgröße ist schwieriger zu erlernen (Abbildung 2.4). Sowohl mit als auch ohne Rückmeldung steigen die Leistungen



Abbildungung 2.3

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 1 (sinusförmige Führungsgröße und Proportional-Transformation). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vo.



Abbildungung 2.4

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 5 (überlagerte Sinusschwingungen und Proportional-Transformation). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vo.

bis zur zehnten Sitzung an, das Maximum scheint auch dann noch nicht erreicht zu sein. Bis auf einige Unregelmäßigkeiten scheint der Verlauf für alle Von ähnlich zu sein.

2.2.1.2 Proportional-Integral-Transformation PI 0,5 (Abbildungen 2.5 und 2.6)

Der Integralanteil der Transformation erhöht die Aufgabenschwierigkeit. Das anfängliche Leistungsniveau liegt unter demjenigen bei proportionaler Transformation. Bei den letzten Sitzungen ist dagegen ein ähnlich hohes Niveau erreicht. Während bei der proportionalen Transformation die maximalen Korrelationen bereits bei der zweiten oder dritten Sitzung erreicht werden, dauert es diesmal bis etwa zur vierten oder fünften Sitzung.

Bei fehlender Rückmeldung ergibt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei der reinen Proportional-Transformation.

2.2.1.3 Proportional-Integral-Transformation PI 0,8 (Abbildungen 2.7 und 2.8)

Die weitere Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit ist deutlich zu erkennen. Die Leistungen setzen auf einem noch niedrigeren Niveau an, und die maximalen Korrelationen werden noch später erreicht.

Dies gilt allerdings nicht mehr für die unregelmäßige Führungsgröße. Dort ist eine systematische Leistungsverbesserung nur noch ansatzweise zu beobachten. Eine Reihe von Von weisen unsystematische Veränderungen über die Versuchssitzungen auf. Noch deutlicher wird dies, wenn man die Korrelationen bei fehlender Rückmeldung betrachtet: Die Veränderungen über die Sitzungen lassen keinen Leistungsfortschritt erkennen.

2.2.1.4 Integral-Transformation (Abbildungen 2.9 und 2.10)

Diese Transformation ist ebenfalls nur noch bei sinusförmiger Führungsgröße zu erlernen. Es zeigt sich, daß die Leistung

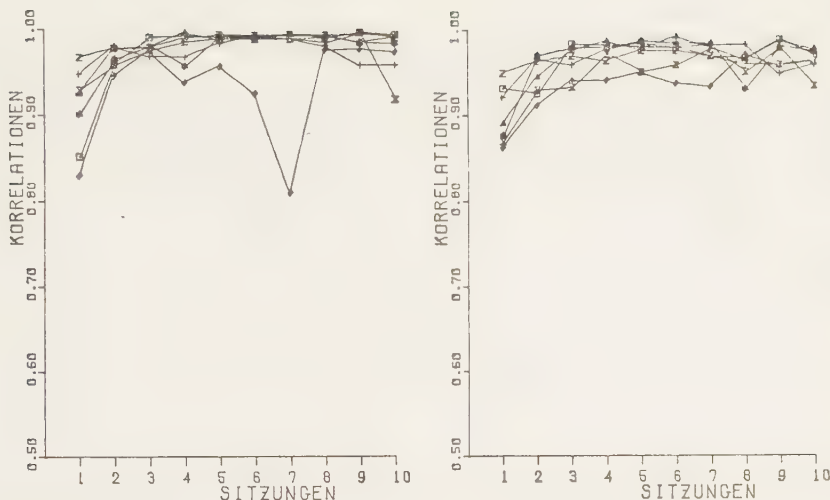


Abbildung 2.5

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 3 (sinusförmige Führungsgröße und Proportional-Integral-Transformation PI 0,5). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vp.

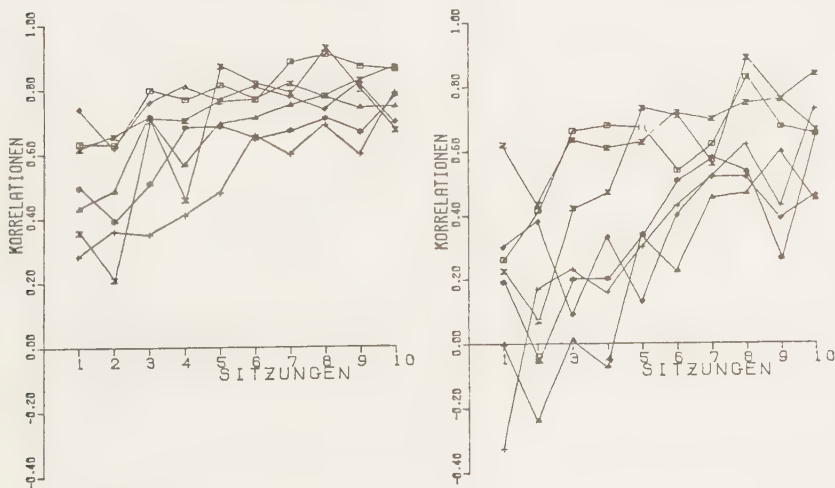


Abbildung 2.6

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 7 (überlagerte Sinusschwingungen und Proportional-Integral-Transformation PI 0,5). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vp.

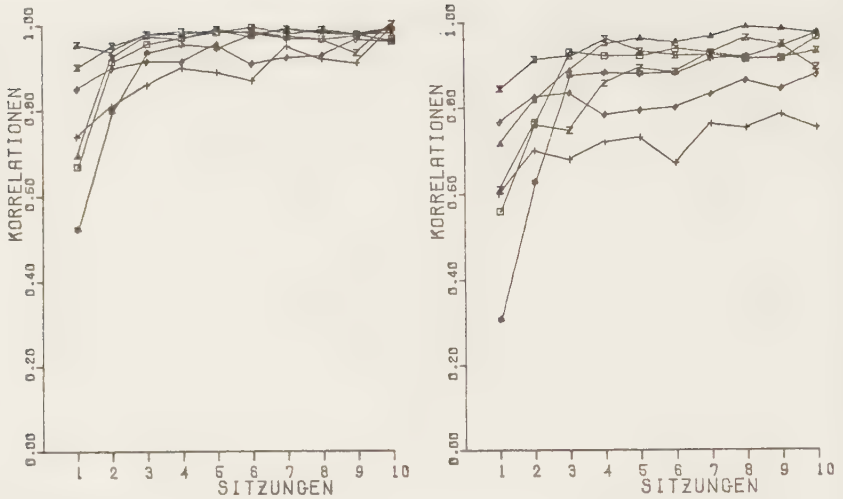


Abbildung 2.7

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 4 (sinusförmige Führungsgröße und Proportional-Integral-Transformation PI 0,8). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vp.

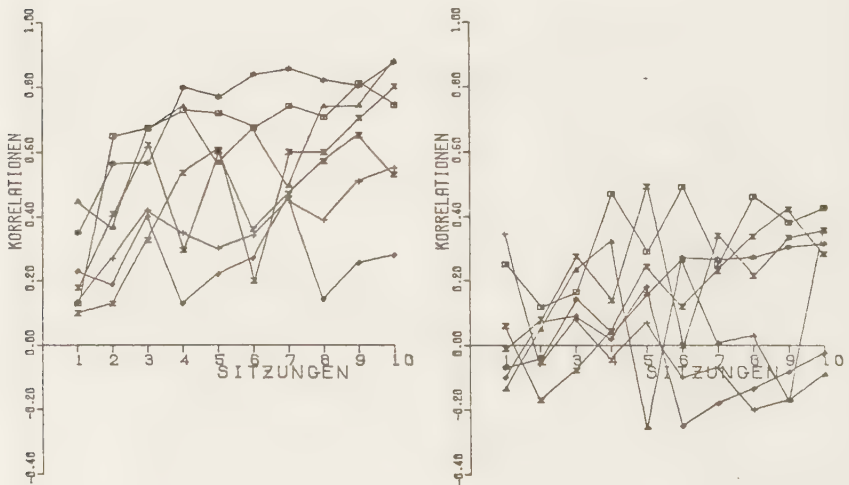


Abbildung 2.8

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 8 (überlagerte Sinusschwingungen und Proportional-Integral-Transformation PI 0,8). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vp.

über einen Zeitraum von vier Sekunden auch ohne visuelle Rückmeldung des Istwertes aufrecht erhalten werden kann. Dies ist bei unregelmäßiger Führungsgröße nicht mehr möglich. Es bestehen keine substantiellen Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert. Auch bei vorhandener Rückmeldung ergeben sich im Mittel nur geringe Korrelationen.

2.2.2 Zeitverschiebungen

Im folgenden werden die mittleren Zeitverschiebungen pro Versuchsbedingung dargestellt, bei denen die Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Führungsgröße und Istwert ihr erstes Maximum erreichen.

2.2.2.1 Zeitverschiebung mit Rückmeldung (Abbildung 2.11)

Der Unterschied zwischen den beiden Führungsgrößen zeigt sich in zwei Gruppen von Kurven: Bei sinusförmiger Führungsgröße (Bedingungen 1 bis 4) liegen die Kurven dicht zusammen, die Zeitverschiebungen sind minimal, d. h. der von den Von erzeugte Istwert bleibt nicht oder nur minimal hinter der Führungsgröße zurück. Die unterschiedliche Schwierigkeit der vier Transformationen wird bei den ersten Sitzungen deutlich: Mit zunehmendem Integralanteil steigt die Schwierigkeit; die Von zeigen entsprechend ausgeprägte Rückhalte in der ersten Sitzung. Bis zur vierten Sitzung gleichen sich die Werte an, trotz geringer Unterschiede bleibt die Reihenfolge der vier Transformationen jedoch im wesentlichen erhalten.

Bei der unregelmäßigen Führungsgröße weisen alle Gruppen deutliche negative Zeitverschiebungen der maximalen Korrelation auf. Die Von bleiben also im Mittel über alle Sitzungen hinter der Führungsgröße zurück. Trotz unsystematischer Schwankungen bei verschiedenen Sitzungen scheint die Reihenfolge innerhalb dieser vier Gruppen der bei regelmäßiger Führungsgröße zu entsprechen. Das Ausmaß des mittleren Rückhaltes nimmt mit steigendem Integralanteil der Transformation zu.

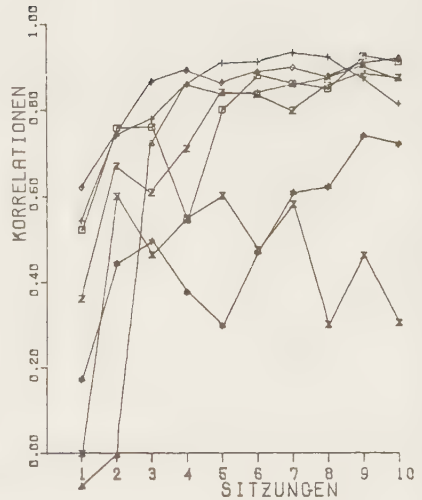
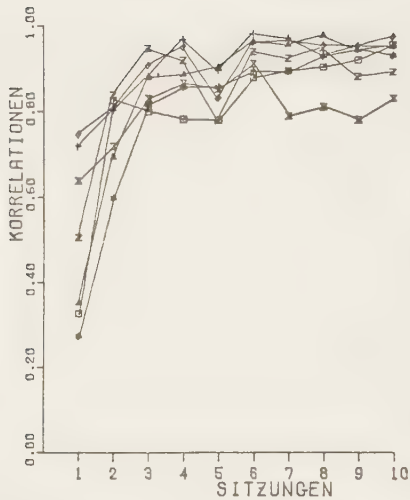


Abbildung 2.9

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 2 (sinusförmige Führungsgröße und Integral-Transformation). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vp.

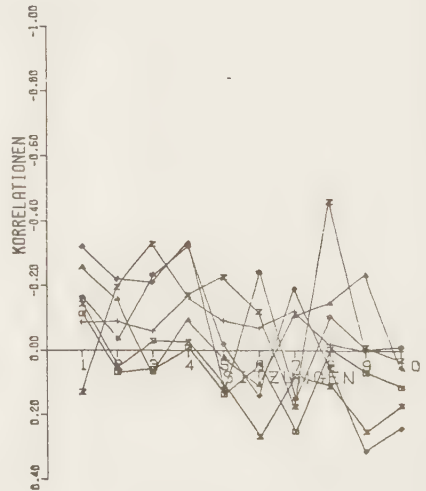
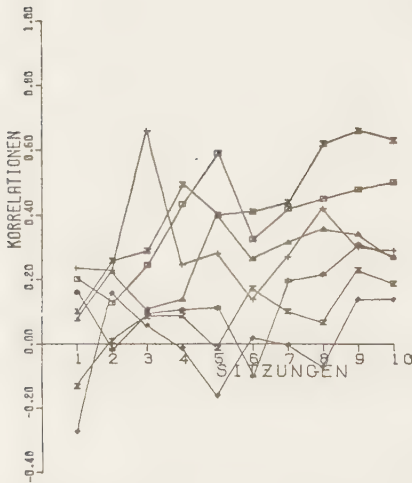


Abbildung 2.10

Pro Versuchssitzung gemittelte Korrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung (linker Teil) bzw. ohne Rückmeldung (rechter Teil) für Versuchsbedingung 6 (überlagerte Sinusschwingungen und Integral-Transformation). Jede Kurve bezieht sich auf eine Vp.

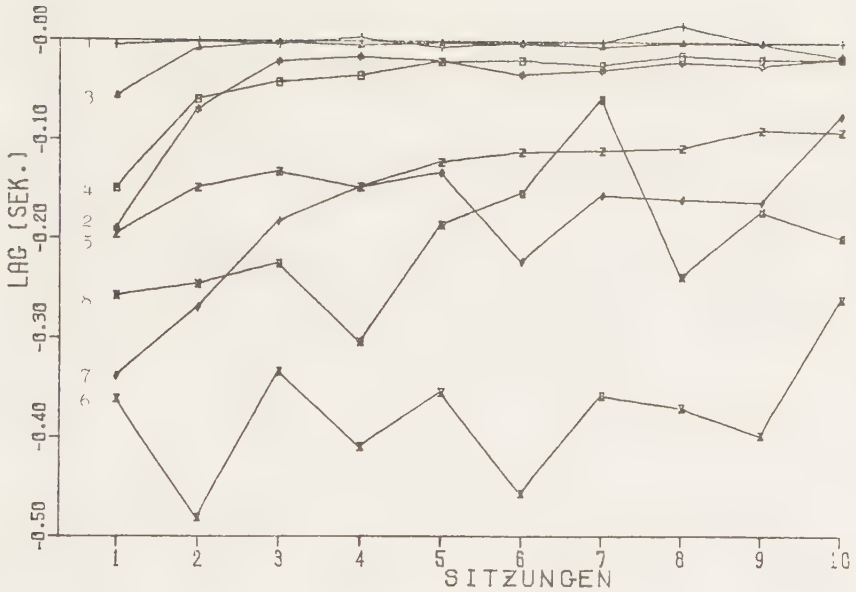


Abbildung 2.11

Pro Versuchssitzung gemittelte Zeitverschiebungen (Lags), bei denen die Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Führungsgröße und Istwert mit Rückmeldung ihr erstes Maximum erreichen. Jede Kurve repräsentiert eine Versuchsbedingung.

Die Unterschiede zwischen den Kurven der beiden Führungsgrößen weisen darauf hin, daß die unregelmäßige Führungsgröße kaum vorhergesagt werden kann, die mittleren Rückhalte liegen im Bereich der menschlichen Reaktionszeit oder darüber; ein Hinweis darauf, daß die Vpn vorwiegend auf wahrgenommene Änderungen der Führungsgröße reagieren.

2.2.2.2 Zeitverschiebung ohne Rückmeldung (Abbildung 2.12)

Bis zu einem Integralanteil von 0,5 (Bedingungen 1 und 3) zeigen sich bei sinusförmiger Führungsgröße keine substantiellen Zeitverschiebungen. Bei Bedingung 4 beträgt die Zeitverschiebung relativ konstant etwa -0,1 Sekunden, bei Bedin-

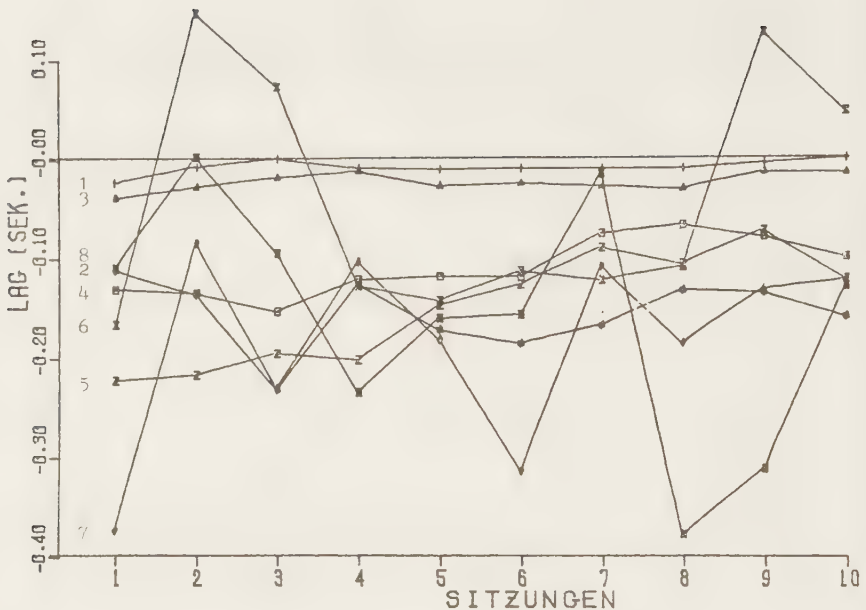


Abbildung 2.12

Pro Versuchssitzung gemittelte Zeitverschiebungen (Lags), bei denen die Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Führungsgröße und Istwert ohne Rückmeldung ihr erstes Maximum erreichen. Jede Kurve repräsentiert eine Versuchsbedingung.

gung 2 etwa -0,15 Sekunden und bei Bedingung 5 nimmt die Zeitverschiebung von -0,2 Sekunden in der ersten Sitzung bis zu etwa -0,1 Sekunden in den letzten Sitzungen ab.

Die drei letzten Bedingungen, unregelmäßige Führungsgröße mit integralem Anteil der Transformation, weisen unsystematische Verläufe auf. Dies deutet darauf hin, daß diese Trackinganordnungen nicht so gut gelernt werden können, daß einigermaßen konstante Leistungen ohne visuelle Rückmeldung des Istwertes möglich wären. Dies deutete sich ja bereits bei den Korrelationen ohne Zeitverschiebung an.

2.2.3 Zusammenfassung

Sowohl zwischen den beiden Führungsgrößen als auch zwischen den vier Transformationen bestehen deutliche Unterschiede. Diese Unterschiede zeigen sich sowohl bei den Korrelationen ohne Zeitverschiebung als auch bei den Zeitverschiebungen, die dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktionen entsprechen.

Zeitverschiebungen geben an, bei welcher zeitlicher Verschiebung der Kurven von Führungsgröße und Istwert der korrelative Zusammenhang zwischen ihnen ein Maximum erreicht. Sie sind also Maßzahlen für Vor- oder Rückhalte der Vpn.

Die einfache Sinusschwingung von 0,51 Hz ist bei allen Transformationen zu lernen; mit größerem Integralanteil der Transformation steigt vor allem die Zeit, die im Mittel benötigt wird, um zur maximalen Leistung zu gelangen. In den letzten Sitzungen zeigen alle Vpn Korrelationen zwischen 0,9 und 1,0, d.h. die Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufes von Führungsgröße und Istwert ist nahezu perfekt.

Daß diese Leistungsverbesserungen einen Lernfortschritt widerspiegeln, läßt sich erkennen, wenn man die Werte für Abschnitte ohne Rückmeldung betrachtet. Die Korrelationen liegen zwar unter denen bei vorhandener Rückmeldung, jedoch sind vergleichbare Lernverläufe festzustellen. Die Vpn können also auch ohne visuelle Rückmeldung Bewegungen vollziehen, die unter Berücksichtigung der Transformation einen Istwert-Verlauf ergeben, der demjenigen der Führungsgröße gut entspricht.

Bei der aus fünf überlagerten Sinusschwingungen bestehenden Führungsgröße liegen die Korrelationen auch nach zehn Sitzungen deutlich niedriger. Das gilt um so mehr, je höher der Integralanteil der Transformation ist. Erwartungsgemäß ist der Verlauf wesentlich schlechter vorherzusagen; die maximalen Korrelationen treten erst bei substantiellen Zeitverschiebungen auf. Bei einem Integralanteil von mehr als 50 % tritt keine systematische Leistungsverbesserung mehr ein. Bei fehlender

Rückmeldung zeigen sich dementsprechend unsystematische Streuungen der Korrelationsmittelwerte pro Sitzung um den Wert Null. Auch die Zeitverschiebungen für die maximalen Korrelationen schwanken unsystematisch.

Im Sinne der Fragestellung dieser ersten Untersuchung kann man also festhalten, daß die Bedingungen 2 und 5 zu einem längerfristigen Lernprozeß führen, der nach zehn Sitzungen immer noch Leistungsverbesserungen zuläßt. Die intersubjektive Variation scheint bei Bedingung 5 (unregelmäßige Führungsgröße und Proportional-Transformation) geringer zu sein als bei Bedingung 2 (regelmäßige Führungsgröße und Integral-Transformation).

2.3. Diskussion

Die Ergebnisse der ersten Untersuchung zeigen, daß man zwischen dem Erlernen der Führungsgröße und dem Erlernen der Transformation des Bediensignals unterscheiden muß. Die Analyse der Leistungsverläufe bei den verwendeten Kombinationen von Führungsgröße und Transformation ergibt diesbezüglich folgende Hinweise:

Eine einfache periodische Sinusschwingung kann auch bei schwierigen Transformationen des Bediensignals gut reproduziert werden. Die aus fünf überlagerten Sinusschwingungen mit Frequenzen zwischen 0,11 Hz und 0,91 Hz bestehende Führungsgröße ist jedoch selbst bei einer Proportional-Transformation des Bediensignals erst nach längerer Übungsdauer hinreichend gut zu beherrschen. Bei schwierigerer Transformation liegt das Leistungsmaximum selbst nach zehn Stunden Übung deutlich unter demjenigen bei der einfachen Führungsgröße.

Die größere Schwierigkeit der unregelmäßigen Führungsgröße hängt vor allem damit zusammen, daß die Vpn den zeitlichen Verlauf dieser Führungsgröße nicht vorhersagen können, wie die Daten der Zeitverschiebungen bei maximalen Korrelationen belegen. Bei proportionaler Transformation betragen die Zeitverschiebungen im Mittel etwa -0,1 Sekunden, d.h. die Bewegungen

der Vpn liegen etwa um diese Zeit hinter der Führungsgröße zurück, entsprechen aber dem Verlauf der Führungsgröße recht gut.

Die menschliche Reaktionszeit bei motorischen Reaktionsaufgaben liegt bei etwa 200 msec. Faßt man die Zeitverschiebungen als Reaktionszeitäquivalente auf, so liegen sie deutlich unter den normalen Reaktionszeiten. Dies deutet darauf hin, daß die Vpn den Verlauf der Führungsgröße zwar nicht ganz vorhersagen können, kleinere Änderungen von Richtung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung aber ausreichen, die kontinuierliche Bewegung der Vpn zu modifizieren.

Die Schwierigkeit der Transformationen ist deutlich abgestuft; sie nimmt mit zunehmendem Integralanteil zu. Diese Komponente der Aufgabenschwierigkeit spielt nur zu Beginn des Lernprozesses eine Rolle. Bei der sinusförmigen Führungsgröße treten ab der dritten Sitzung nur noch geringe Leistungsverbesserungen auf; das Erlernen der Transformation scheint selbst bei einer reinen Integraltransformation bereits zu diesem Zeitpunkt weitgehend abgeschlossen.

3. ZWEITE UNTERSUCHUNG

Die Trackinganordnung mit einer unregelmäßigen, aus mehreren überlagerten Sinusschwingungen bestehenden Führungsgröße erwies sich in der ersten Untersuchung als geeignet zur Überprüfung eines längerfristigen sensomotorischen Lernprozesses. Die Schwierigkeit dieser Anordnung war nicht zu groß, d. h. die Vpn waren nicht überfordert und zeigten deutliche Fortschritte. Andererseits war die Anordnung auch nicht zu leicht, so daß auch in der zehnten Versuchssitzung noch Verbesserungen zu erkennen waren.

Darauf aufbauend wurde für die zweite Untersuchung eine Versuchsanordnung entwickelt, die systematische Variationen der Lernsituation beinhaltete und bessere Voraussetzungen zur gezielten Analyse bot.

3.1 Methode

Als Lernaufgabe wurde wieder eine Folgetrackinganordnung verwendet. Der Lernprozeß wurde zu verschiedenen Zeitpunkten durch eine Belastung der Vpn mittels einer Nebentätigkeit beeinflusst. Zur Diagnose des jeweiligen Lernfortschrittes wurde kurzfristig die Rückmeldung über den Istwert ausgeschaltet.

3.1.1 Trackinganordnung

Der apparative Aufbau entsprach dem der ersten Untersuchung: Die Vpn saßen vor einem Oszillographenschirm, auf dem Führungsgröße und Istwert durch verschiedene Marken angezeigt wurden. Ihr rechter Unterarm ruhte auf einem Hebel, der Ellenbogen befand sich über dem Drehpunkt des Hebels. Unter dem Drehpunkt war ein Potentiometer angebracht, an dem eine der jeweiligen Arm-(Hebel-)Position entsprechende Spannung abgegriffen und proportional als Istwert auf dem Oszillographenschirm abgebildet wurde. Über dem Bildschirm waren verschiedene Lämpchen zur Voranzeige der jeweiligen Versuchsbedingung angebracht. Neben dem Oszillographen befanden

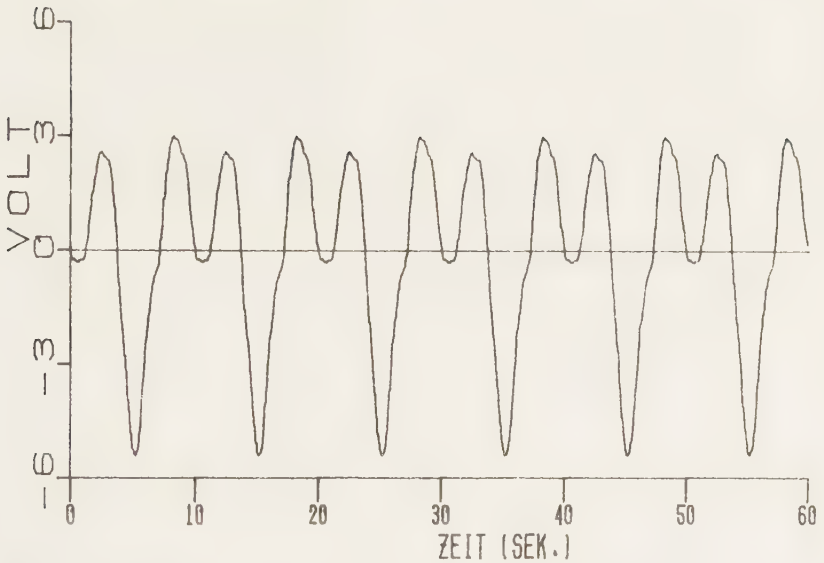


Abbildung 3.1

Sechs hintereinander geschaltete Perioden der Führungsgröße.

sich zwei digitale Anzeigen, die das Fehlerintegral bzw. die Anzahl falscher oder ausgelassener Reaktionen bei der Nebentätigkeit anzeigten.

Die Führungsgröße bestand aus aneinandergereihten Perioden von jeweils zehn Sekunden Dauer. Dadurch ist es möglich, zu verschiedenen Zeiten jeweils Datenabschnitte herauszugreifen, die direkt vergleichbar sind, da der Verlauf der Führungsgröße identisch ist. Andererseits bleibt ein gewisses Maß an Unregelmäßigkeit erhalten, denn eine Periodik von zehn Sekunden ist nicht leicht zu erkennen. Abbildung 3.1 zeigt sechs solcher hintereinander geschalteter Perioden. Es werden sechs Perioden abgebildet, da dies der Dauer der Datenregistrierung entspricht (siehe unten). Die Führungsgröße weist pro Periode zwei Maxima und ein Minimum auf. Positive Werte entsprechen einer Position in der rechten Hälfte des Oszillographenschirmes, negative einer Position in der linken Hälfte.

3.1.2 Nebentätigkeit (Wahlreaktionsaufgabe)

Der bei der Trackingaufgabe zu analysierende Lernprozeß sollte durch Vorgabe einer zusätzlichen Aufgabe beeinträchtigt werden. Als eine mögliche Art solcher belastender Nebentätigkeiten wurden im ersten Kapitel Reaktionsaufgaben genannt.

Wir entschieden uns für eine Wahlreaktionsaufgabe. Als Reize dienten vier Töne unterschiedlicher Frequenz. Die Vpn mußten als Reaktion eine von vier zugeordneten Tasten mit den Fingern der linken Hand drücken. Die Hand lag dabei auf einer Unterlage, die Finger berührten die Reaktionstasten.

Zwei Aspekte sind beim Einsatz einer zusätzlichen Tätigkeit von Bedeutung: Einmal kann eine durch Doppeltätigkeit erzeugte Belastung in einem frühen Stadium des Lernprozesses andere Auswirkungen haben als in einem späteren Stadium, da die beim Lernen einsetzende "Automatisierung" die Ausführung einer zweiten Aufgabe erleichtert. Dies wurde ausgenutzt, um durch Einsatz der Nebentätigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten des Lernprozesses zu klären, wann und in welchem Maße der beim Lernen der oben beschriebenen Trackingaufgabe einsetzende Fortschritt gehemmt werden kann (siehe unten).

Der zweite Aspekt betrifft die interindividuellen Unterschiede hinsichtlich der Reaktionszeiten bei einer Wahlreaktionsaufgabe. Es ist notwendig, die Schwierigkeit und damit die belastende Wirkung der Nebentätigkeit an der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Vp zu orientieren, um die Ergebnisse verschiedener Vpn miteinander vergleichen zu können.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die belastende Wirkung der Wahlreaktionsaufgabe dadurch kontrolliert, daß der zeitliche Abstand zwischen den Signalen aufgrund der mittleren Reaktionszeit und der Standardabweichung der Reaktionszeit einer Vp festgelegt wurde. Dieser Vorgehensweise liegt folgende Überlegung zugrunde: Bei konstantem Intervall zwischen den Signalen entstehen für eine Vp mit relativ kurzer Reaktionszeit längere Pausen zwischen ihrer Reaktion und dem

nächsten Reiz als bei einer Vp mit relativ langer Reaktionszeit. Bestimmt man aber für jede Vp ihre durchschnittliche Reaktionszeit und verwendet diese als Intervall zwischen den Signalen, so wird für alle Vpn der folgende Reiz im Durchschnitt unmittelbar nach erfolgter Reaktion dargeboten. Nimmt man als Zeitintervall die mittlere Reaktionszeit zuzüglich einer Konstanten, so entspricht die Pause zwischen Reaktion und nächstem Signal im Mittel dieser Konstanten. Die Schwierigkeit ist demnach im oben verstandenen Sinne für alle Vpn gleich. Dies gilt aber nur dann, wenn die Varianz der Reaktionszeiten für alle Vpn etwa gleich ist. Eine Vp mit hoher Varianz der Reaktionszeiten kann bei ihren extrem langen Reaktionen eventuell über der gewählten Konstante liegen. Daher bestimmten wir das Signalintervall aus mittlerer Reaktionszeit ($\bar{x}_{RZ}$) zuzüglich einer Konstanten, die das Sechsfache der Standardabweichung der Reaktionszeiten (SD_{RZ}) der jeweiligen Vp betrug: $\bar{x}_{RZ} + 6SD_{RZ}$.

Um eine möglichst konstante Leistung in der Nebentätigkeit zu erreichen, wurde in der Instruktion hervorgehoben, daß beim Tracking mit gleichzeitiger Nebentätigkeit auf keinen Fall in der Leistung bei der Nebentätigkeit nachgelassen werden durfte, vor allem sollten keine Reaktionen ausgelassen werden.

3.1.3. Überprüfung des Lernverlaufes durch Ausschalten der Rückmeldung

Wie in der ersten Untersuchung wurde der Lernfortschritt in der Trackingaufgabe durch Ausblenden der Rückmeldung über den Istwert überprüft. Die Ausschaltung der Rückmeldung wurde allerdings nicht mehr zu Beginn einzelner Durchgänge vorgenommen, sondern gegen Ende. Einzelheiten dazu werden im folgende Abschnitt dargestellt.

3.1.4 Struktur des Versuchsaufbaus

Es wurden drei Versuchsgruppen mit jeweils zehn Vpn gebildet. Die erste Gruppe (Kontrollgruppe; K) sollte die Trackingaufgabe ohne Belastung durch Nebentätigkeit lernen (Vpn 1-10).

Bei der zweiten Gruppe (Experimentalgruppe 1; E1) sollte der Lernprozeß im ersten Drittel des Versuches durch gleichzeitige Darbietung der Nebentätigkeit belastet werden (Vpn 11-20). Bei der dritten Gruppe (Experimentalgruppe 2; E2) wurde der Lernprozeß erst im zweiten Drittel belastet (Vpn 21-30). Das letzte Drittel war bei allen Gruppen frei von Belastungen, um zu überprüfen, ob der erreichbare Endzustand unterschiedlich ausfiel.

Alle Vpn absolvierten zehn Sitzungen von etwa einer Stunde Dauer. Die erste Sitzung diente ausschließlich zur Einübung der Reaktionsaufgabe und zur Bestimmung der mittleren Reaktionszeit.

Dazu wurden zuerst fünf Sequenzen von je 100 Signalen mit einer eingeschobenen Pause von einer Minute dargeboten. Die Abstände zwischen der Reaktion der Vp auf ein Signal und dem folgenden Signal betrugen konstant zwei Sekunden. Anschließend wurde eine Pause von fünf Minuten gemacht. Die Sitzung wurde abgeschlossen mit weiteren drei Sequenzen von je 100 Signalen. Aus den Werten dieser 300 Reaktionen wurden die mittleren Reaktionszeiten und die Standardabweichung der Reaktionszeiten für jede Vp berechnet. Das Signalintervall für die folgenden Versuchsabschnitte mit Nebentätigkeit wurde nach der Formel $\bar{x}_{RZ} + 6SD_{RZ}$ bestimmt.

Jede der folgenden Sitzungen zwei bis zehn bestand aus zwei Versuchsblöcken mit einer eingeschobenen Pause von zehn Minuten. Es gab zwei Arten von Versuchsblöcken:

1. Übungsblöcke, bei denen die Vpn je nach Versuchsgruppe und Sitzung die Trackingaufgabe mit oder ohne Nebentätigkeit übten. Diese Blöcke wurden generell nicht registriert.
2. Testblöcke, die aus Kombinationen der beschriebenen Komponenten des Versuchs (Tracking, Nebentätigkeit und Ausblendung der Rückmeldung) bestanden. Diese Testblöcke wurden registriert.

Tabelle 3.1 zeigt den Aufbau der Sitzungen für die verschiedenen Versuchsgruppen. Gruppe E1 sollte im ersten Drittel des Versuchs (Sitzungen zwei bis vier), Gruppe E2 im zweiten

=====

Tabelle 3.1

Verteilung von Übungsblöcken (Ü) und Testblöcken (T) für die drei Versuchsgruppen. Registrierte Blöcke sind unterstrichen.

Sitzung	Gruppe K	Gruppe E1	Gruppe E2
1	Reaktionsaufg.	Reaktionsaufg.	Reaktionsaufg.
2	Ü1 <u>T1</u>	Ü2 <u>T2</u>	Ü1 <u>T1</u>
3	Ü1 Ü1	Ü2 Ü2	Ü1 Ü1
4	Ü1 <u>T1</u>	Ü2 <u>T2</u>	Ü1 <u>T1</u>
5	Ü1 <u>T1</u>	Ü1 <u>T1</u>	Ü2 <u>T2</u>
6	Ü1 Ü1	Ü1 Ü1	Ü2 Ü2
7	Ü1 <u>T1</u>	Ü1 <u>T1</u>	Ü2 <u>T2</u>
8	Ü1 <u>T1</u>	Ü1 <u>T1</u>	Ü1 <u>T1</u>
9	Ü1 Ü1	Ü1 Ü1	Ü1 Ü1
10	Ü1 <u>T1</u>	Ü1 <u>T1</u>	Ü1 <u>T1</u>

=====

Versuchsdrittel (Sitzungen fünf bis sieben) unter Belastung üben. Es waren daher zwei Arten von Übungsblöcken erforderlich: Eine Version (Ü1) bestand aus reiner Trackingtätigkeit, bei der zweiten (Ü2) wurden immer Tracking und Nebentätigkeit (NT) zusammen ausgeführt.

Jede Sitzung (außer der ersten) begann also mit einem Übungsblock. Die Daten wurden jeweils in den Testblöcken registriert, also im zweiten Block der Sitzungen 2, 4, 5, 7, 8 und 10.

Für beide Arten von Übungsblöcken gab es entsprechende Testblöcke. Der Aufbau von Übungs- und Testblöcken ist in Tabelle 3.2 wiedergegeben. Jeder Block bestand aus 12 Durchgängen, von denen nur die unterstrichenen registriert wurden. Im ersten Durchgang eines Blockes wurde immer die Reaktionsaufgabe geübt (NT). Bei den folgenden Durchgängen wurde entweder nur die Trackingaufgabe ausgeführt (TR), Tracking gekoppelt mit der Nebentätigkeit (TR+NT) oder Tracking ohne Rückmeldung (TRor).

Tabelle 3.2

Aufbau der Übungsblöcke (Ü) und Testblöcke (T). Registrierte Durchgänge sind unterstrichen (Erläuterungen im Text).

D u r c h g ä n g e										
Blöcke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12
Ü1	NT	TR	TR	TR	TR	TR	TR	TR	TR	TR
Ü2	NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT	TR+NT
T1-1	NT	TR	TR	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TRoR</u>
T2-1	NT	TR+NT	TR+NT	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TRoR</u>
T1-2	NT	TR	TR	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TRoR</u>
T2-2	NT	TR+NT	TR+NT	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TR+NT</u>	<u>TR</u>	<u>TRoR</u>

Der Unterschied zwischen den Übungsblöcken wurde bereits erläutert. Testblöcke vom Typ 1 (T1-1 und T1-2) unterschieden sich von denjenigen vom Typ 2 (T2-1 und T2-2) nur in den Durchgängen 2 und 3. Bei T1 wurde dort Tracking alleine, bei T2 zusammen mit der Nebentätigkeit verlangt. Damit war gewährleistet, daß in dem Versuchsdrittel, wo unter Belastung geübt wurde, auch in den beiden nicht erfaßten Trackingdurchgängen der Testblöcke entsprechende Bedingungen herrschten.

Betrachten wir als nächstes die registrierten Durchgänge. Jeder Testblock enthielt neun solcher Durchgänge; drei, bei denen nur die Trackingaufgabe ausgeführt wurde, drei Durchgänge mit Tracking und Nebentätigkeit sowie drei Durchgänge ohne Rückmeldung. Damit war gewährleistet, daß die drei Komponenten insgesamt gleich häufig vertreten waren. Die beiden Unterformen der Testblöcke unterschieden sich in der Abfolge von Tracking und Tracking mit Nebentätigkeit. Jeweils die Hälfte der Versuchspersonen jeder Versuchsgruppe erhielt eine der beiden Versionen, und zwar die Versuchspersonen 1-5, 11-15 und 21-25 die Versionen T1-1 bzw. T2-1 und die Versuchspersonen 6-10, 16-20 und 26-30 die Versionen T1-2 bzw. T2-2. Damit waren

eventuelle Reihenfolgeeffekte ausbalanciert.

Als letztes muß der Aufbau der Durchgänge beschrieben werden. Alle Durchgänge dauerten 80 Sekunden mit einer anschließenden Pause von 20 Sekunden. In den ersten 15 Sekunden dieser Pause wurden Rückmeldungen über die Güte der Trackingleistung bzw. die Zahl falscher oder ausgelassener Reaktionen bei der Nebentätigkeit gegeben. Während der letzten fünf Sekunden der Pause wurde durch verschiedene Lämpchen angezeigt, ob im nächsten Durchgang Tracking und/oder Nebentätigkeit erfolgen würde.

Bei Durchgängen, in denen nur die Nebentätigkeit geübt wurde, richtete sich die Gesamtzahl der in 80 Sekunden dargebotenen Signale bei jeder Vp nach ihrer mittleren Reaktionszeit und der Standardabweichung.

Ein Durchgang der Trackingaufgabe bestand aus acht hintereinander geschalteten Perioden der Führungsgröße, die Gesamtdauer betrug ebenfalls 80 Sekunden. Von diesen acht Perioden dienten die ersten beiden als Eingewöhnungsphase; sie wurden nicht registriert. Pro Durchgang liegen also die Werte von sechs Perioden der Führungsgröße vor, dies entspricht einer Dauer von 60 Sekunden (vgl. Abb. 3.1).

Eine letzte Besonderheit betrifft die Durchgänge ohne Rückmeldung. 60 Sekunden ohne Rückmeldung wären viel zu lange gewesen, daher wurde die Rückmeldung nur bei jeder zweiten Periode ausgeblendet. Die sechs registrierten Perioden bei diesen Durchgängen waren also folgendermaßen gegliedert: Die Perioden 1, 3 und 5 sind mit Rückmeldung (also normales Tracking), die Perioden 2, 4 und 6 ohne Rückmeldung.

Als Versuchspersonen nahmen männliche Schüler und Studenten im Alter von 16 bis 32 Jahren gegen Bezahlung am Versuch teil.

3.1.5. Datenregistrierung

Der zeitliche Verlauf von Führungsgröße, Armbewegung und Istwert wurde auf Magnetband aufgezeichnet, und zwar mit einer Frequenz von 25 Hz, d.h. alle 0,04 Sekunden wurde die

momentane Position der drei Größen erfaßt. Zusätzlich wurden Zeitpunkt der Reizdarbietung, Nummer des Signals (1 bis 4), Reaktionszeit (bei erfolgter Reaktion) und Nummer der Reaktionstaste registriert.

3.1.6 Zusammenfassung

Drei Gruppen von je zehn Versuchspersonen führten eine Folgetrackingaufgabe mit proportionaler Transformation des Bediensignals durch. Jede Vp absolvierte zehn Sitzungen von jeweils etwa einer Stunde Dauer.

Zusätzlich zur Trackingaufgabe mußte in bestimmten Versuchsabschnitten gleichzeitig eine Wahlreaktionsaufgabe (vier Töne unterschiedlicher Frequenz sollten durch Drücken einer von vier zugeordneten Reaktionstasten beantwortet werden) ausgeführt werden. Diese Nebentätigkeit sollte als Belastungsfaktor das Erlernen der Trackingaufgabe beeinträchtigen. Dazu wurde sie bei den drei Versuchsgruppen zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingesetzt, um die Anfälligkeit des Lernprozesses gegenüber zusätzlichen Belastungen zu verschiedenen Zeitpunkten zu untersuchen.

Als eine weitere Manipulation zur Überprüfung des Lernfortschrittes wurde teilweise die Rückmeldung über den Istwert ausgeschaltet, d. h. die Vpn erhielten keine visuelle Rückmeldung über den Effekt ihrer Bewegung.

Jede der zehn Sitzungen bestand aus zwei Blöcken, Übungsblöcken oder Testblöcken. Der erste Block war jeweils ein Übungsblock. In den Sitzungen 2, 4, 5, 7, 8 und 10 war der zweite Block ein Testblock. Nur bei den Testblöcken wurden die Daten teilweise aufgezeichnet, und zwar neun Durchgänge von jeweils 60 Sekunden Dauer (sechs Perioden der Führungsgröße). Davon bestanden jeweils drei Durchgänge aus Tracking, Tracking mit Nebentätigkeit oder Tracking mit Ausblendung der Rückmeldung bei jeder zweiten Periode.

Von sechs der zehn Sitzungen liegen also Daten vor, und zwar

pro Sitzung über je 18 Perioden Tracking, Tracking mit Nebentätigkeit sowie je neun Perioden Tracking mit Rückmeldung und Tracking ohne Rückmeldung.

Pro Periode wurden 250 Datenpunkte aufgezeichnet; dies entspricht einer Frequenz von 25 Hz.

3.2. Auswertung

Die Auswertung der Datenbänder erfolgte am Prozeßrechner des Psychologischen Institutes in Tübingen. Die erforderlichen Rechenprogramme wurden vom Verfasser erstellt.

3.2.1. Fehlermaße

Vier Fehlermaße wurden berechnet:

- a) mittlerer konstanter Fehler
- b) mittlerer absoluter Fehler
- c) Wurzel aus dem mittleren Fehlerquadrat
- d) Standardabweichung des Fehlers.

Im Abschnitt 1.2.3 wurden die Formeln zur Berechnung der vier Fehlermaße angegeben. Außerdem wurde darauf hingewiesen, daß mittlerer konstanter Fehler und Standardabweichung die am besten geeigneten Maße zur Analyse des Lernprozesses darstellen, da sowohl konstante Fehler als auch variable Fehler erfaßt werden. Bei der Darstellung der Ergebnisse werden wir uns daher im wesentlichen auf diese beiden Fehlermaße beschränken.

Alle Fehlermaße wurden jeweils für eine Periode der Führungsgröße berechnet, also für einen Zeitraum von zehn Sekunden oder 250 Datenpunkten.

Beim konstanten Fehler müßte bei allen 250 Datenpunkten die Differenz zwischen Istwert und Führungsgröße gebildet und daraus der Mittelwert berechnet werden. Ein solcher Mittelwert gibt jedoch keine eindeutigen Hinweise darauf, ob die V_p hinter der Führungsgröße zurückbleibt oder ihr vorausseilt, wenn die Führungsgröße ihre Richtung ändert. Dies ist in Abbildung 3.2 veranschaulicht. Sie zeigt eine Periode der verwendeten

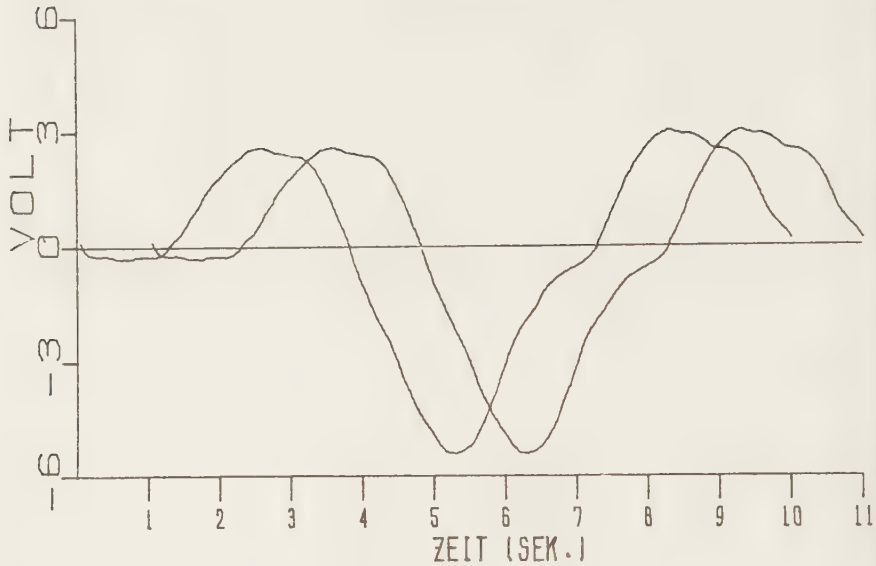


Abbildung 3.2.

Zwei Perioden der Führungsgröße, um eine Sekunde gegeneinander verschoben.

Führungsgröße und eine Istwert-Kurve, die um einen konstanten Zeitfaktor (eine Sekunde) verschoben ist. Berechnet man den konstanten Fehler, indem man jeweils die Ordinatenwerte der Führungsgröße von denen der Istwert-Kurve subtrahiert, so erhält man für den Zeitraum von Null bis zum Schnittpunkt der Kurven nach dem ersten Maximum negative Fehlerwerte, zwischen diesem Schnittpunkt und dem Schnittpunkt nach dem Minimum positive Fehlerwerte usw. Positive und negative Fehlerwerte würden sich also weitgehend aufheben, so daß der resultierende konstante Fehler keine eindeutige Aussage über Vor- oder Rückhalt der Vp ermöglicht.

Um dieses Problem zu umgehen, und damit die konstanten Fehlerwerte direkt als Maß für einen Vor- oder Rückhalt interpretieren

tieren zu können, haben wir den konstanten Fehler folgendermaßen berechnet: Vom Beginn der Führungsgröße bis zum ersten Maximum wurde die Differenz zwischen Führungsgröße und Istwert gebildet (F minus I), ebenso zwischen dem Minimum und dem zweiten Maximum. Zwischen erstem Maximum und Minimum bzw. zwischen zweitem Maximum und dem Periodenende wurde die Differenz zwischen Istwert und Führungsgröße gebildet (I minus F). Der so berechnete mittlere Fehler gibt relativ exakt (bis auf Abweichungen an den Extrempunkten der Führungsgröße) einen mittleren Vorhalt bzw. Rückhalt von Istwert gegenüber der Führungsgröße an: Negative Werte entsprechen einem Rückhalt, positive einem Vorhalt.

3.2.2 Kreuzkorrelationen

Auch die Kreuzkorrelationen zwischen Führungsgröße und Istwert wurden über eine Periode berechnet. Da die Bewegungen mit einer Dichte von 25 Werten pro Sekunde aufgezeichnet wurden, standen 250 Werte von Führungsgröße und Istwert pro Periode zur Verfügung. Für die Korrelationen wurden immer 200 Werte herangezogen. Dadurch war es möglich, eine Zeitverschiebung von 50 Werten, das entspricht zwei Sekunden, vorzunehmen. Dies erwies sich als vollkommen ausreichend, da die Maxima der Kreuzkorrelationen in allen Fällen bei einer zeitlichen Verschiebung von weit unter zwei Sekunden lagen. Korrelationen ohne Zeitverschiebung ergaben sich somit aus den ersten 200 Werten einer Periode, solche mit einer Zeitverschiebung von +2 Sekunden aus den ersten 200 Werten der Führungsgröße mit den Werten 51-250 des Istwertes. Bei einer Zeitverschiebung von -2 Sekunden wurden die ersten 200 Werte des Istwertes mit den Werten 51-250 der Führungsgröße korreliert. Die Berechnung erfolgte nach der Produkt-Moment-Formel.

Für diese Kreuzkorrelationsfunktionen einzelner Perioden wurden das erste Maximum und die entsprechende Zeitverschiebung ermittelt. Diese Daten wurden getrennt für Perioden ohne Nebentätigkeit, mit Nebentätigkeit sowie ohne bzw. mit Rückmeldung zusammengefaßt.

3.2.3 Nebentätigkeit

Da die Nebentätigkeit nur als Belastungsfaktor eingeführt wurde und die Vpn instruiert waren, eine möglichst konstante Leistung bei den Reaktionsaufgaben zu erzielen, wurden die Daten nicht systematisch analysiert. Bei der Darstellung einzelner Perioden in Abschnitt 3.3.4 sind jeweils die Anzahl der Signale sowie die Anzahl richtiger, falscher, ausgelassener und zu kurzer (kürzer als 100 msec) Reaktionen aufgeführt.

3.2.4 Zusammenfassung

Die Auswertung wurde jeweils über eine Periode der Führungsgröße - also zehn Sekunden - vorgenommen. Zur Beurteilung der Trackingleistung wurden vier Fehlermaße und drei aus den Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Führungsgröße und Istwert abgeleitete Variablen berechnet. Von den vier Fehlermaßen (mittlere konstante Abweichung, mittlere absolute Abweichung, Wurzel aus dem mittleren Abweichungsquadrat und Standardabweichung) liefern zwei statistisch unabhängige Informationen. Die erste Kenngröße ist der mittlere konstante Fehler, der so berechnet wurde, daß direkte Maßzahlen für den mittleren Vor- bzw. Rückhalt resultierten. Die zweite, davon unabhängige Variable ist die Standardabweichung der Differenz zwischen Führungsgröße und Istwert. Sie ist in erster Linie ein Maß für die Regelmäßigkeit der Bewegungen der Vp in Relation zum Verlauf der Führungsgröße. Die beiden anderen Fehlermaße werden nur in Abschnitt 3.3.4 teilweise dargestellt.

Die drei Variablen der Kreuzkorrelationsfunktionen sind:

- a) die Korrelationen ohne Zeitverschiebung, also Maßzahlen für die Übereinstimmung der zeitlichen Verläufe von Führungsgröße und Istwert (daher der Standardabweichung ähnlich),
- b) das erste Maximum der Kreuzkorrelationsfunktionen und
- c) das Ausmaß der entsprechenden zeitlichen Verschiebung von

Führungsgröße und Istwert, bei der die Korrelationsfunktion ihr erstes Maximum erreicht.

Die Daten der Reaktionsaufgaben wurden nicht systematisch analysiert.

3.3. Ergebnisse

Ein erst nachträglich bemerkter Defekt der Versuchsapparatur bewirkte, daß die Datenaufzeichnung teilweise unvollständig war und außerdem die Datenbänder an einigen Stellen nicht gelesen werden konnten. Daher liegen für einige Vpn nur unvollständige Daten vor. Die vorliegenden Darstellungen enthalten jeweils fünf Vpn pro Versuchsgruppe. Es handelt sich um die Vpn 1, 2, 3, 7 und 8 bei der Kontrollgruppe; Vpn 13, 14, 16, 17 und 20 bei Experimentalgruppe 1 sowie die Vpn 21 bis 25 bei Experimentalgruppe 2. Auch bei diesen Vpn fehlen teilweise Daten; eine weitere Reduzierung der Versuchspersonenzahl scheint jedoch nicht ratsam.

Eine übliche und auch angemessene Form der Ergebnisdarstellung könnte sich auf einen Vergleich der drei Gruppen beschränken und statistisch überprüfen, ob signifikante Unterschiede zwischen ihnen bestehen. Hier soll jedoch den im Verlauf des Lernprozesses auftretenden Änderungen der Tätigkeitsstruktur nachgegangen werden. Wir werden dementsprechend über eine solche, an den Gruppenmittelwerten orientierte Auswertung hinausgehen und insgesamt vier Ebenen der Datenauswertung vorstellen:

- (1) Veränderung der Gruppenmittelwerte über die Sitzungen,
- (2) Veränderung der individuellen Mittelwerte innerhalb der Gruppen über die Sitzungen,
- (3) Veränderung der individuellen Einzeldaten pro Periode über die Sitzungen und
- (4) Darstellung einzelner Versuchsdurchgänge für bestimmte Vpn.

Auf jeder der ersten drei Ebenen können die Ergebnisse der zwei Fehlervariablen und der drei Korrelationskenngrößen dargestellt werden. Da diese jeweils für eine Periode berechnet wurden, lassen sich vier Teilaspekte unterscheiden:

- (a) Werte für Perioden ohne Nebentätigkeit (nur Tracking),
- (b) Werte für Perioden mit Nebentätigkeit,
- (c) Werte für Perioden mit Rückmeldung und
- (d) Werte für Perioden ohne Rückmeldung.

Somit liegen für jede der drei Ebenen 20 verschiedene Indizes vor. Da die Ergebnisse in graphischen Darstellungen zusammengefaßt werden, muß im Sinne einer Überschaubarkeit eine Reduzierung vorgenommen werden. Eine generelle Reduzierung besteht darin, daß Perioden mit Rückmeldung (Teilaspekt c) weggelassen werden. Dabei handelt es sich um Perioden von normalem Tracking (Teilaspekt a), denen Perioden ohne Rückmeldung vorausgehen bzw. folgen. Es ist daher kein wesentlicher Informationsgewinn zu erwarten. Weitere Reduzierungen werden in den betreffenden Abschnitten angegeben.

Einige Bemerkungen zur Ergebnisdarstellung sind an dieser Stelle erforderlich. Weil es darum geht, Veränderungen darzustellen, die als Hinweise auf zugrundeliegende Lernprozesse gewertet werden können, werden die Daten in graphischen Darstellungen zusammengefaßt. Der Informationsgehalt der Abbildungen nimmt auf den vier genannten Ebenen zu. Die Verläufe einzelner Kurven sind dadurch zunehmend schwieriger zu identifizieren. Andererseits wäre es unökonomisch, die Verläufe für einzelne Vpn auf allen Ebenen getrennt darzustellen.

Wegen der großen Zahl von Einzeldarstellungen ist es außerdem erforderlich, einige Abbildungen zusammenzufassen und entsprechend zu verkleinern. Es wird dabei versucht, die Verteilung von Text und Abbildungen so vorzunehmen, daß beides im Zusammenhang gesehen werden kann.

Zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Darstellungen

werden jeweils einheitliche Skalenmaßstäbe verwendet. Sofern die Abszisse nicht mit der Nulllinie übereinstimmt, ist diese zusätzlich eingezeichnet (konstante Fehlerwerte und Zeitverschiebungen). Die Ordinaten der Korrelationsdarstellungen reichen bei der Darstellung der Gruppenmittelwerte von 0,75 bis 1,0; bei allen anderen Abbildungen von 0,5 bis 1,0. Die Sitzungen (Abszisse) werden von 1 bis 6 durchnummeriert, um die Drittelung des Versuchsablaufes besser darstellen zu können. Bezogen auf die zehn Versuchssitzungen handelt es sich aber um die Sitzungen 2, 4, 5, 7, 8 und 10 (vgl. Abschnitt 3.1.4).

3.3.1 Vergleich der Gruppenmittelwerte

Die Verläufe der Gruppenmittelwerte über die registrierten Sitzungen werden für jede abhängige Variable in einer graphischen Darstellung zusammengefaßt. Zur Beurteilung dieser Graphiken werden jeweils drei Aspekte auf statistische Signifikanz geprüft:

Erstens wird festgestellt, ob sich die beiden Experimentalgruppen von der Kontrollgruppe unterscheiden (U-Tests; LIENERT, 1973, 213).

Zweitens wird geprüft, ob sich die Mittelwerte der abhängigen Variablen pro Sitzung innerhalb der Versuchsgruppen signifikant voneinander unterscheiden, d.h. ob überhaupt eine Leistungsänderung stattfand, die man als Lernprozeß interpretieren kann (FRIEDMAN-Tests; LIENERT, 1973, 345).

Drittens wird geprüft, ob die Unterschiede zwischen zwei jeweils aufeinanderfolgenden Sitzungen einer Versuchsgruppe signifikant sind (WILCOXON-Tests; LIENERT, 1973, 322). Dies dient in erster Linie zur statistischen Absicherung von Veränderungen der abhängigen Variablen bei Einführung bzw. Wegfall der Nebentätigkeit.

Die Ergebnisse der beiden ersten Signifikanzprüfungen werden an den entsprechenden Stellen im Text mitgeteilt. Falls Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen einer Gruppe signifikant sind (dritte Prüfung), ist dies in den graphischen Darstellungen durch ein "s" an der Verbindungslinie dieser beiden Sitzungen kenntlich gemacht.

Da keine spezifischen Hypothesen formuliert werden konnten und wegen der geringen Versuchspersonenzahl wird bei allen statistischen Absicherungen ein Signifikanzniveau von 10 Prozent zugrunde gelegt.

3.3.1.1 Fehler

Zum besseren Verständnis der Darstellungen wird noch einmal kurz das den Fehlerwerten zugrundeliegende Kalkül erläutert. Eine Vp, die bei den 250 Datenpunkten einer Periode gleich häufig und mit gleichem Betrag hinter der Führungsgröße zurückbleibt (Nachhalt) wie ihr vorausseilt (Vorhalt), erzielt einen konstanten Fehler von etwa Null, d.h. Vorhalt und Nachhalt heben sich in etwa auf. Ein positiver konstanter Fehler bedeutet also, daß die Vp im Durchschnitt um den betreffenden Wert der Führungsgröße vorausseilt.

Die Standardabweichung ist demgegenüber eine Maßzahl für die mittlere Streuung der Abweichungen um ihren Mittelwert. Eine Vp, die relativ heftige Korrekturen während einer Periode vornimmt, kann einen kleinen konstanten Fehler erreichen, ihre Standardabweichung wird dagegen groß ausfallen. Eine andere Vp, die mit einer gleichmäßigen Bewegung der Führungsgröße gut folgen kann, wird sowohl einen kleinen konstanten Fehler als auch eine geringe Standardabweichung aufweisen. Man muß also beide Fehlerwerte berücksichtigen, um zu einer Aussage über das Verhalten der Vpn zu gelangen.

(a) Tracking ohne Nebentätigkeit

Bei den konstanten Fehlern (Abbildung 3.3) unterscheiden sich die beiden Experimentalgruppen nicht signifikant von

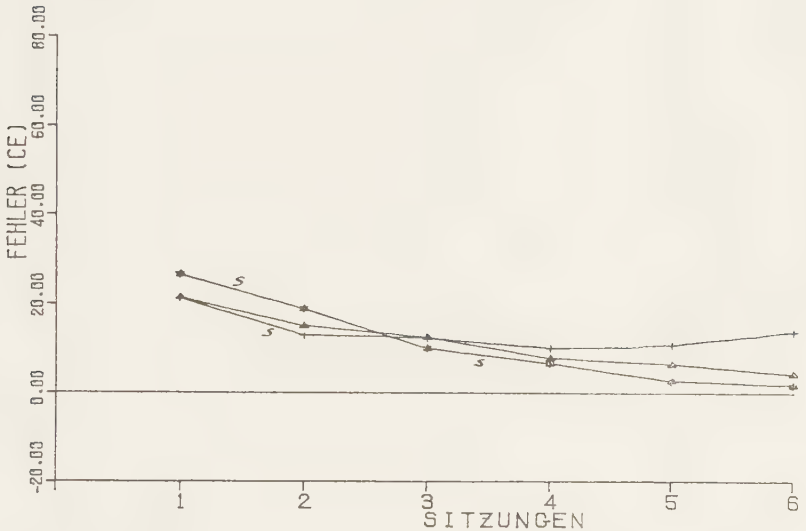


Abbildung 3.3

Mittlere konstante Fehler der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; *: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking ohne Nebentätigkeit. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

der Kontrollgruppe. Die Veränderungen über die Sitzungen sind bei allen drei Gruppen signifikant, d.h. es findet eine Leistungsverbesserung statt.

Bei den Standardabweichungen (Abbildung 3.4) ist der Unterschied zwischen der Kontrollgruppe und Experimentalgruppe 1 signifikant. Über die Sitzungen verändern sich nur die Werte der Experimentalgruppe 1 signifikant.

Die Werte bei Trackingperioden ohne Nebentätigkeit können als direkter Indikator für den jeweiligen Leistungsstand der Gruppen bei der Trackingaufgabe interpretiert werden. Alle drei Gruppen weisen bei allen Sitzungen positive konstante Fehler auf, d.h. sie eilen der Führungsgröße im Mittel immer voraus. Das Ausmaß des Vorhaltes nimmt in den späteren Sitzungen ab.



Abbildung 3.4

Mittlere Fehlerstandardabweichungen der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking ohne Nebentätigkeit. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

Die Unterschiede zwischen den Gruppen sind zwar bei den Fehlerarten gering und bis auf eine Ausnahme nicht signifikant, dennoch zeichnet sich ein Einfluß der Belastung auf die Trackingleistungen ab: Gruppe K zeigt über die Sitzungen relativ konstante Leistungen. Gruppe E1, die ja in den Sitzungen 1 und 2 unter Belastung übte, hat bei diesen beiden Sitzungen die höchsten konstanten Fehler, verbessert sich aber ständig und weist bei den beiden letzten Sitzungen die geringsten Fehler auf. Die Standardabweichungen dieser Gruppe sind signifikant geringer als die der beiden anderen Gruppen. Gruppe E2 hat in den ersten drei Sitzungen etwa gleiche Werte wie die Kontrollgruppe, wird aber ab der vierten Sitzung bei der Standardabweichung besser als diese. Die Verringerung des konstanten Fehlers in der vierten Sitzung wird bei dieser Gruppe durch eine Erhöhung der Variabilität erreicht, offenbar auch eine Auswirkung der Belastung, obwohl dieser Effekt bei der dritten Sitzung nicht auftritt, und die Unterschiede

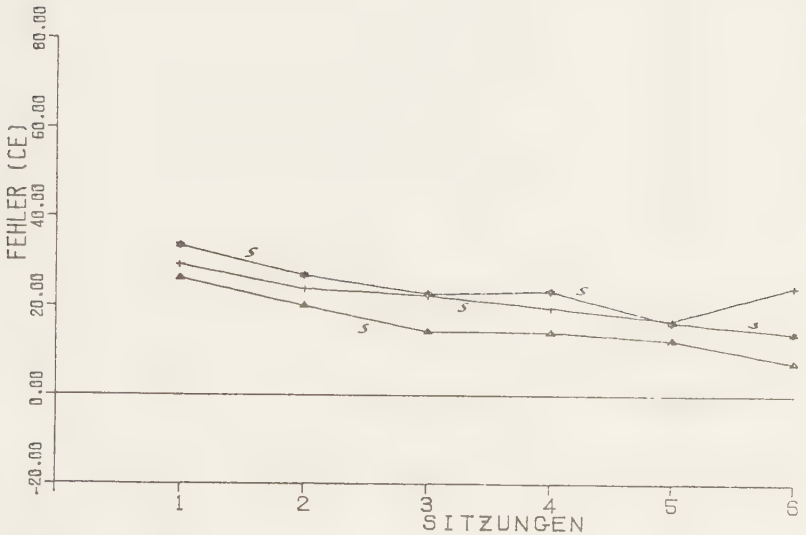


Abbildung 3.5

Mittlere konstante Fehler der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; *: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking mit Nebentätigkeit. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

zwischen den Sitzungen nicht signifikant sind.

Lernen unter Belastung scheint demnach die Leistung geringfügig zu verschlechtern, nach Wegfall der Belastung zeigt sich jedoch eine schnellere Leistungsverbesserung als beim Lernen ohne Belastung. Je früher die Belastung erfolgt, desto eher scheint der Lernprozeß davon zu profitieren. Wegen der numerisch recht geringen Unterschiede und der bis auf wenige Ausnahmen nicht signifikanten Unterschiede zwischen den Sitzungen ist diese Aussage jedoch relativ unsicher.

(b) Tracking mit Nebentätigkeit

Bei den konstanten Fehlern (Abbildung 3.5) unterscheidet sich Experimentalgruppe 2 signifikant von beiden anderen Gruppen. Die Veränderungen über die Sitzungen sind nur bei Experimentalgruppe 1 signifikant.



Abbildung 3.6

Mittlere Fehlerstandardabweichungen der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchshedingung: Tracking mit Nebentätigkeit. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

Bei den Standardabweichungen (Abbildung 3.6) unterscheidet sich Experimentalgruppe 1 signifikant von den beiden anderen Gruppen. Alle drei Gruppen weisen signifikante Leistungsänderungen über die Sitzungen auf.

Es zeigt sich wiederum, diesmal sogar noch deutlicher, daß Belastung zu einer momentanen Leistungseinbuße führt, den gesamten Lernprozeß aber eher fördert. Am deutlichsten wird das bei den Daten der Gruppe E2; die konstanten Fehler dieser Gruppe sind durchweg signifikant geringer als die der beiden anderen Gruppen. Das Einsetzen der Belastung führt aber zu einem deutlichen, allerdings nicht signifikanten Anstieg der Standardabweichungen bei den Sitzungen 3 und 4. Nach Wegfall der Belastung sind die Leistungen signifikant verbessert. Gruppe E1 scheint durch das frühere Einsetzen der Belastung noch mehr zu profitieren; die durchgängig geringen Standardabweichungen

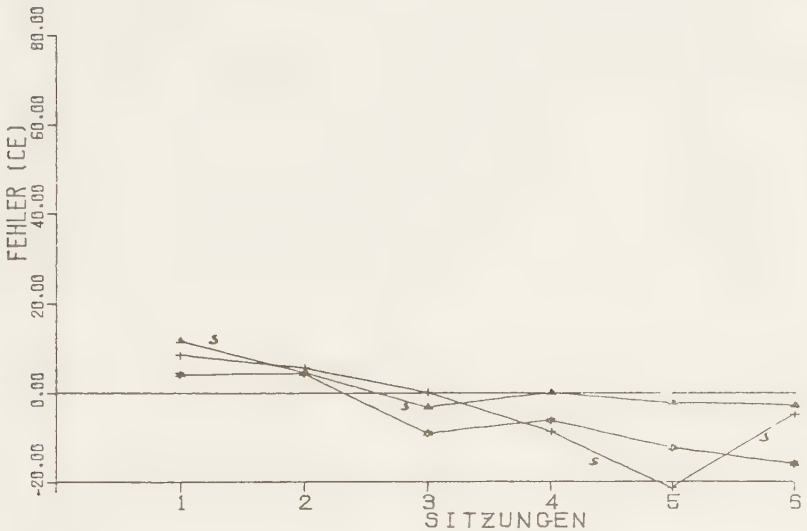


Abbildung 3.7

Mittlere konstante Fehler der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking ohne Rückmeldung. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

weisen auf gleichmäßige Bewegungsverläufe hin. Die konstanten Fehler dieser Gruppe sind zwar etwas höher als bei Gruppe E2, bei den letzten beiden Sitzungen aber niedriger als bei der Kontrollgruppe.

(c) Tracking ohne Rückmeldung

Bei den konstanten Fehlern (Abbildung 3.7) treten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Experimentalgruppen und der Kontrollgruppe auf. Die Veränderungen über die Sitzungen sind nur bei Experimentalgruppe 2 signifikant.

Bei den Standardabweichungen (Abbildung 3.8) liegen die Werte der Experimentalgruppe 1 signifikant über denen der Kontrollgruppe. Nur die Experimentalgruppe 1 weist signifikante Leistungsänderungen über die Sitzungen auf.

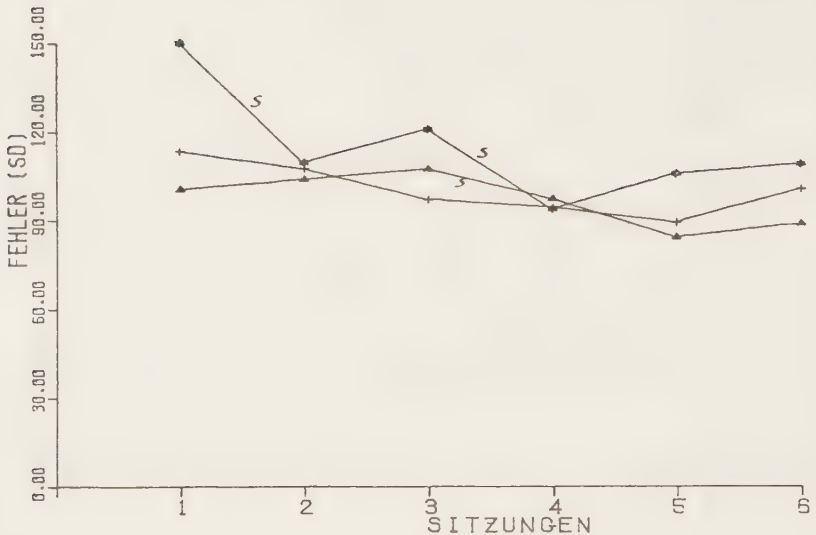


Abbildung 3.8

Mittlere Fehlerstandardabweichungen der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking ohne Rückmeldung. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

Bei Perioden ohne Rückmeldung zeigt sich, daß die Vpn dazu neigen, mit fortschreitender Übung eher hinter der Führungsgröße zurückzubleiben: Die konstanten Fehler werden negativ. Der Verlauf der Kurven ist unsystematischer als bei den beiden anderen Bedingungen. Zwei Aspekte scheinen bedeutsam: Es zeigt sich einmal, daß die Variabilität der Bewegungen bei Gruppe E1 in der ersten Sitzung deutlich größer ausfällt als bei beiden anderen Gruppen, ein Hinweis auf die beeinträchtigende Wirkung der Nebentätigkeit zu Beginn des Lernprozesses.

Zum anderen führt die Einführung der Nebentätigkeit bei Gruppe E2 zu einem geringeren, nicht signifikanten Anstieg der Standardabweichungen; im Gegensatz zu den anderen Gruppen werden die konstanten Fehler aber nicht stärker negativ. Da diese Gruppe zusätzlich die kleinsten variablen Fehler in der letzten Sitzung aufweist, scheint für Tracking ohne Rückmeldung

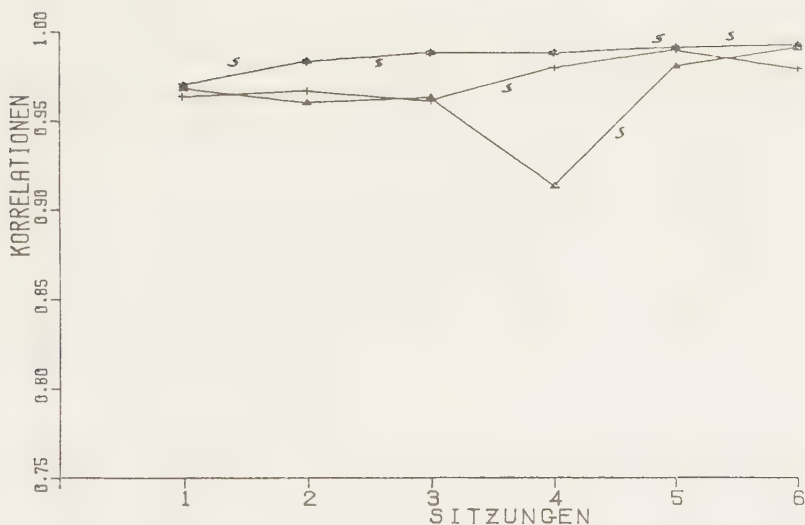


Abbildung 3.9

Mittlere Korrelationen ohne Zeitverschiebung der drei Versuchsgruppen(+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking ohne Nebentätigkeit. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

die Einführung der Belastung im zweiten Versuchsdrittel am günstigsten zu sein.

3.3.1.2 Korrelationen

Die Darstellung der pro Gruppe gemittelten Korrelationen wird auf die Werte der Korrelationen ohne Zeitverschiebung beschränkt, denn diese Werte sind als Maßzahlen für die jeweilige Übereinstimmung von Führungsgröße und Istwert am ehesten mit den Fehlerwerten vergleichbar.

(a) Tracking ohne Nebentätigkeit (Abbildung 3.9)

Nur Experimentalgruppe 1 unterscheidet sich signifikant von der Kontrollgruppe. Die Korrelationsverläufe über die Sitzungen sind bei beiden Experimentalgruppen signifikant, jedoch nicht bei der Kontrollgruppe.

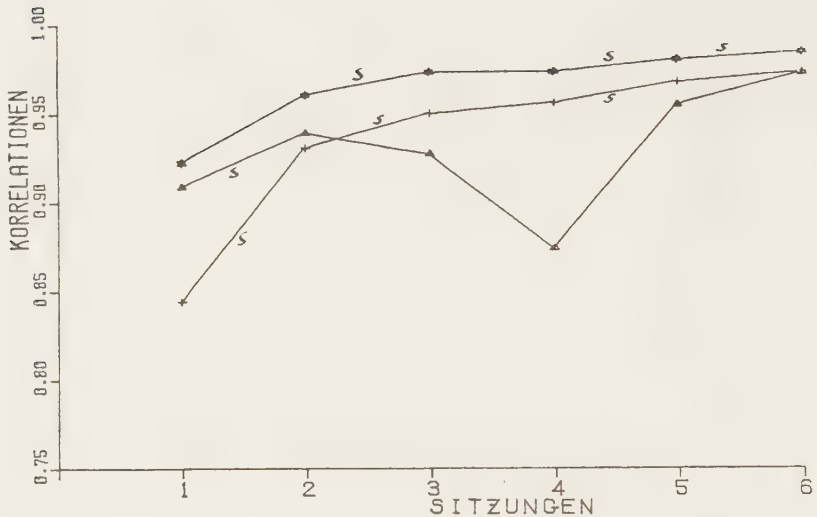


Abbildung 3.10

Mittlere Korrelationen ohne Zeitverschiebung der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking mit Nebentätigkeit. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

Der Verlauf der Korrelationen für Perioden ohne Nebentätigkeit bestätigt, daß die gewählte Trackinganordnung relativ leicht war: Die durchschnittlichen Übereinstimmungen von Führungsgröße und Istwert sind sehr groß.

Lernen unter Belastung führt zu besseren Ergebnissen als Lernen ohne Belastung. Gruppe E1 weist von Anfang an die höchsten Korrelationen auf. Gruppe E2 zeigt einen deutlichen Abfall der Korrelationen nach Einführung der Belastung, danach aber einen sehr starken Leistungszuwachs. Beide Experimentalgruppen zeigen in den letzten Sitzungen bessere Übereinstimmungen zwischen Führungsgröße und Istwert als die Kontrollgruppe.

(b) Tracking mit Nebentätigkeit (Abbildung 3.10)

Wiederum unterscheidet sich nur die Experimentalgruppe 1 signi-



Abbildung 3.11

Mittlere Korrelationen ohne Zeitverschiebung der drei Versuchsgruppen (+: Kontrollgruppe; x: Experimentalgruppe 1; Δ: Experimentalgruppe 2). Versuchsbedingung: Tracking ohne Rückmeldung. Signifikante Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen sind durch ein "s" gekennzeichnet.

fikant von der Kontrollgruppe. Die Korrelationsverläufe über die Sitzungen sind bei allen drei Gruppen signifikant.

Die Korrelationen der Perioden mit Nebentätigkeit ergeben ein ähnliches Bild wie bei Perioden ohne Nebentätigkeit. Alle Gruppen verbessern ihre Leistung bis zur letzten Sitzung. Gruppe E1 profitiert anscheinend von der frühen Einführung der Belastung und hat durchweg die höchsten Korrelationen. Die Einführung der Belastung erst im zweiten Drittel des Versuchs (Gruppe E2) führt wiederum zu einer Leistungsbeeinträchtigung; nach Wegfall der Belastung steigt die Leistung wieder sprunghaft an.

(c) Tracking ohne Rückmeldung (Abbildung 3.11)

Die Korrelationen von Experimentalgruppe 1 unterscheiden sich erneut signifikant von denen der Kontrollgruppe; sie liegen

diesmal aber darunter. Die Experimentalgruppe 1 weist außerdem als einzige signifikante Veränderungen der Korrelationen über die Sitzungen auf.

Ähnlich wie bei den Fehlerwerten erreichen die Gruppen nur geringe Leistungsverbesserungen. Gruppe E1 zeigt einen unsystematischen Verlauf über die Sitzungen. Da die Gruppen sich nur hinsichtlich der Variable Belastung unterscheiden, muß man diesen Unterschied auf die frühere Belastung bei Gruppe E1 zurückführen.

3.3.1.3 Zusammenfassung und Interpretation

Die Einführung der belastenden Nebentätigkeit hatte für die beiden Experimentalgruppen unterschiedliche Auswirkungen. Für die Gruppe E1 zeigte sich das vor allem bei Tracking ohne Rückmeldung und für die Gruppe E2 bei Tracking mit bzw. ohne Nebentätigkeit.

Betrachten wir zunächst die Experimentalgruppe 1. Was bedeutet der Abfall der Korrelationen bei Tracking ohne Rückmeldung?

Bei Perioden ohne Rückmeldung fehlt die visuelle Kontrolle der eigenen Bewegung. Die Vpn sind also auf andere Informationen über die Güte der Bewegung angewiesen; sie müssen bei der Bewegungskontrolle von exterozeptiven auf propriozeptive Reize übergehen. Ein solcher Übergang wurde in Abschnitt 1.1.4 als "Internalisierung" bezeichnet. Die Belastung gleich zu Beginn des Lernprozesses scheint die Internalisierung zu stören und längerfristig, d.h. auch nach Wegfall der Belastung, zu verhindern. Bei der Kontrollgruppe und Experimentalgruppe 2 findet dagegen offenbar eine Internalisierung statt; die Vpn sind von der ersten Sitzung an in der Lage, auch ohne visuelle Rückmeldung dem Verlauf der Führungsgröße relativ gut angepaßte Bewegungen zu vollziehen.

Es ist aufgrund der Ergebnisse bei den anderen abhängigen Variablen unwahrscheinlich, daß die Vpn der Gruppe E1 den

zeitlichen Verlauf der Führungsgröße schlechter vorhersagen konnten, zumal die Information über die Führungsgröße für alle Gruppen gleich war. Die eher geringeren Fehler der Gruppe E1 bei Tracking mit bzw. ohne Nebentätigkeit lassen den Schluß zu, daß die Trackingleistung dieser Vpn vornehmlich aus Fehlerkorrekturen bestand und sie deshalb stärker auf eine visuelle Rückmeldung des Istwertes angewiesen waren. Man könnte auch sagen, daß ihre Tätigkeit sich vorwiegend auf im Kurzzeitgedächtnis gespeicherte Informationen stützte und eine Übernahme ins Langzeitgedächtnis, also eine Internalisierung oder Automatisierung bzw. Programmbildung, nicht stattfand.

Die Tatsache, daß die Korrelationen bei fehlender Rückmeldung auch nach Wegfall der Belastung deutlich unter denen der anderen Gruppen liegen, ist ein Indiz dafür, daß die zu Beginn des Lernprozesses erworbenen Handlungsstrategien auch unter veränderten Aufgabenbedingungen beibehalten wurden. Einschränkung muß man jedoch feststellen, daß die relativ geringe Zahl von Durchgängen ohne Rückmeldung eine Änderung der Strategie nicht unbedingt erforderte.

Betrachten wir die Ergebnisse der Experimentalgruppe 2, so zeigt sich, daß die Einführung der Belastung im zweiten Versuchsdrittel einen anderen Effekt hatte: Die Leistungen dieser Gruppe wurden bei Tracking ohne Rückmeldung kaum schlechter; die Internalisierung des Bewegungsverlaufes war also beim Einsetzen der Nebentätigkeit weitgehend abgeschlossen.

Die Leistungen bei Tracking mit bzw. ohne Nebentätigkeit wurden dagegen während der Belastungsphase schlechter und stiegen anschließend deutlich an. Eine solche Leistungseinbuße war als Folge erhöhter Anforderungen an die Kanalkapazität zu erwarten. Im Sinne der Ausführungen in Abschnitt 1.1.4 kann man sagen, daß die Vpn der Experimentalgruppe 2 bis zum Einsetzen der Nebentätigkeit Ansätze eines Bewegungsprogramms ausgebildet hatten, dieses aber noch nicht so gefestigt war, daß genügend freie Kapazität zur Bewältigung der Nebentätigkeit zur Verfügung stand. Da die Leistung in der Nebentätigkeit Vorrang hatte, ging die Belastung der Kapazität auf Kosten der Trackingleistungen.

Ein nicht erwarteter Effekt der Nebentätigkeit besteht darin, daß Lernen unter Belastung zwar während der Belastung geringe Leistungseinbußen zur Folge hat, nach Wegfall der Belastung die Leistungen aber deutlich höher liegen als bei Lernen ohne Belastung. Dies deutet darauf hin, daß Lernen unter Belastung für den "Endzustand" des Lernprozesses förderlicher sein kann als Lernen ohne Belastung, und zwar umso mehr, je früher die Belastung einsetzt.

Allerdings kann dieser leistungsfördernde Effekt langfristig auch von Nachteil sein, wenn ihm, wie oben für die Ergebnisse der Gruppe E1 dargestellt wurde, keine Automatisierung im Sinne einer Übernahme in das Langzeitgedächtnis, sondern ein primär fehlerkorrigierendes Verhalten zugrunde liegt.

3.3.2 Vergleich der individuellen Mittelwerte innerhalb der Gruppen

Die in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Ergebnisse stützen sich auf die Mittelwerte der Daten von jeweils fünf Vpn. Die teilweise recht plausiblen Kurvenverläufe könnten also auf einer zufälligen, aber systematisch erscheinenden Variation der Werte einzelner Vpn beruhen. Dafür sprechen z.B. die teilweise trotz numerisch großer Unterschiede nicht signifikanten Übergänge zwischen den Sitzungen.

Um dies zu prüfen, werden die pro Versuchssitzung über entsprechende Perioden gemittelten Werte jeder Vp für die drei Gruppen getrennt dargestellt. Für die Unterschiede innerhalb der Gruppen gelten die mitgeteilten Signifikanzangaben; auf weitere statistische Absicherungen wurde wegen der geringen Zahl zugrundeliegender Werte verzichtet.

3.3.2.1 Fehler

In den folgenden Abbildungen sind jeweils alle einzelnen Diagramme für jeweils eine Versuchsgruppe zusammengefaßt, um eine bessere Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Einzelabbildungen entsprechen denen in Abschnitt 3.3.1.1.

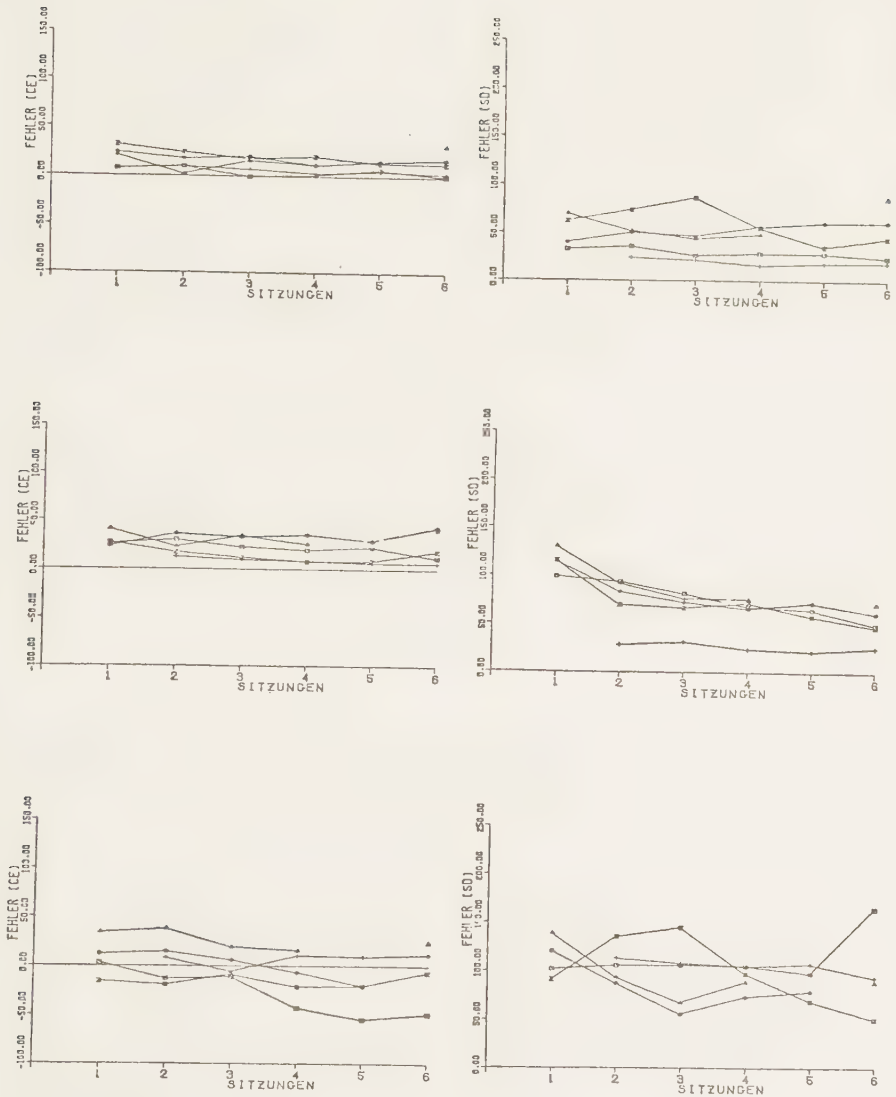


Abbildung 3.12

Mittlere konstante Fehler (CE) und Fehlerstandardabweichungen (SD) der fünf Vpn der Kontrollgruppe. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

(a) Kontrollgruppe (Abbildung 3.12)

Die fünf Vpn unterschieden sich im wesentlichen nicht systematisch. Bei den Perioden ohne bzw. mit Nebentätigkeit weisen alle Vpn einen positiven konstanten Fehler auf. Der größte konstante Fehler der Vp 3 in Sitzung 6 (die Werte für Sitzung 5 fehlen bei dieser Vp) bewirken den leichten Anstieg der Gruppe K in Abbildung 3.3. Der starke Anstieg in Abbildung 3.5, ebenfalls in Sitzung 6, resultiert daraus, daß drei der fünf Vpn in Sitzung 6 höhere konstante Fehler aufweisen, nämlich die Vpn 2, 3 und 5. Es dürfte sich dabei also eher um eine Folge mangelnder Motivation in der letzten Versuchsstunde als um einen aufgabenspezifischen Effekt handeln.

Ähnliches gilt für den konstanten Fehler bei fehlender Rückmeldung: Vp 3, die durchgehend geringe positive Werte aufweist, fehlt bei Sitzung 5, der Gruppenmittelwert fällt daher relativ hoch negativ aus. Bei Sitzung 6 fehlt der Wert für Vp 2, die vorher einen negativen Wert hatte. Daraus resultiert der Anstieg der Gruppenkurve von Sitzung 5 zu Sitzung 6 (Abbildung 3.7).

(b) Experimentalgruppe 1 (Abbildung 3.13)

Die Unterschiede zwischen den Vpn sind für die Bedingungen Tracking ohne Nebentätigkeit und Tracking mit Nebentätigkeit gering, d.h. es zeigen sich keine systematischen Veränderungen.

Bei der Bedingung Tracking ohne Rückmeldung weisen die Kurven für die Standardabweichungen drei unterschiedliche Verläufe auf. Drei Vpn liegen im Rahmen der üblichen Fehlerwerte; ihre Werte sind relativ ähnlich und nehmen über die Sitzungen nur geringfügig ab. Vp 14 hat in der ersten Sitzung eine hohe Standardabweichung, verbessert sich dann aber sehr stark bis zur vierten bzw. fünften Sitzung, weist aber in der letzten Sitzung wieder eine hohe Standardabweichung auf. Die Kurve von Vp 16 verläuft völlig unsystematisch. Das Fehlerniveau liegt deutlich über dem der anderen Vpn. Es ist daher

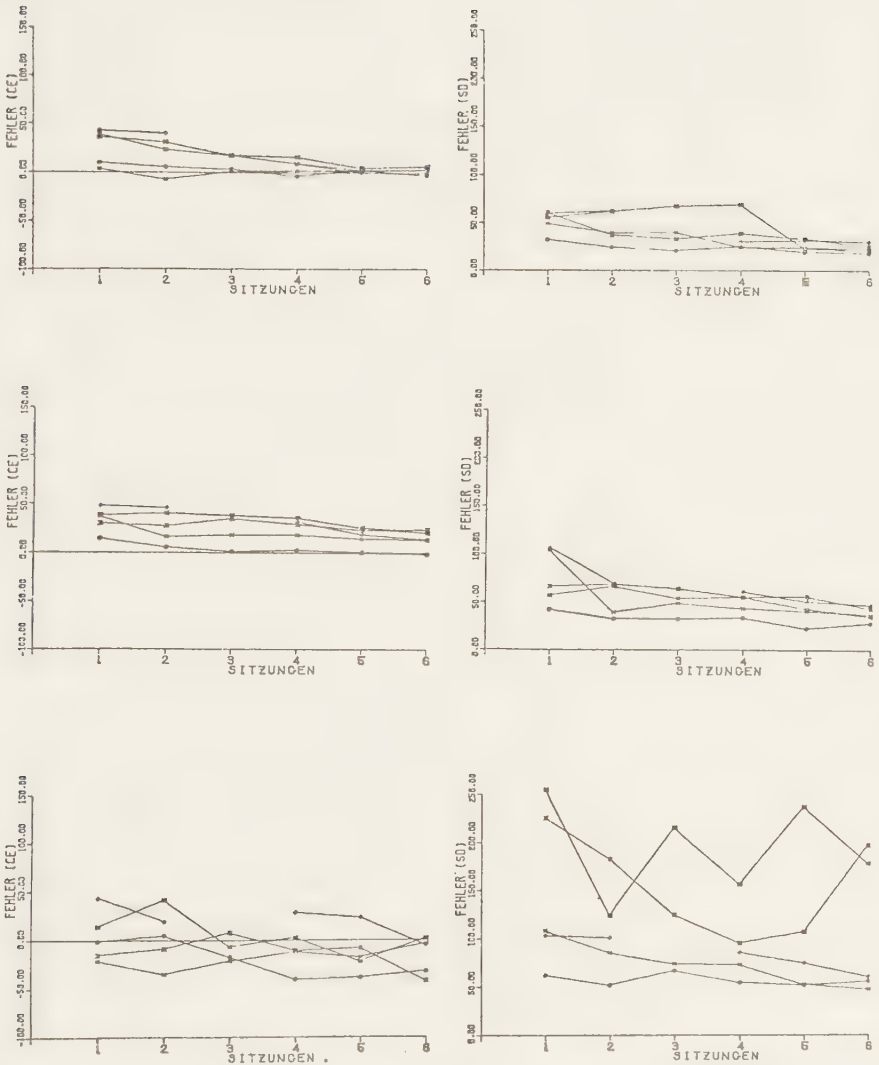


Abbildung 3.13

Mittlere konstante Fehler (CE) und Fehlerstandardabweichungen (SD) der fünf Vpn von Experimentalgruppe 1. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

nicht überraschend, daß die Werte dieser Vp deutlich auf die entsprechende, über die Vpn gemittelte Kurve der Gruppe E1 durchschlagen (Abbildung 3.8).

(c) Experimentalgruppe 2 (Abbildung 3.14)

Bei den Werten für den konstanten Fehler zeigen sich keine systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchspersonen. Das langsamere Absinken der Fehlerwerte über die Sitzungen bei den Kurven der Gruppenmittelwerte geht vor allem auf die Vp 22 zurück. Dies läßt sich am deutlichsten bei der mittleren Darstellung für Perioden mit Nebentätigkeit erkennen. Die anderen Vpn weisen über die Sitzungen etwa gleiche konstante Fehler auf.

Ein anderes Bild ergibt sich bei den Standardabweichungen. Hier hebt sich der Verlauf der Werte von Vp 24 deutlich von dem der anderen Vpn ab. Der in den Abbildungen 3.4, 3.6 und 3.8 zu beobachtende Anstieg der Standardabweichungen von Experimentalgruppe 2 ist offensichtlich in erster Linie auf diese Vp zurückzuführen. Die absoluten Fehler dieser Vp sind bei allen Bedingungen und über alle Sitzungen relativ konstant und gering; das Besondere dieser Vp zeigt sich nur in ihren variablen Fehlern. Worauf diese Besonderheit zurückzuführen ist, läßt sich aus den Kurven in Abbildung 3.14 nicht schlüssig ableiten. Zwar steigen die mittleren Fehler bei Perioden mit Nebentätigkeit genau in den Sitzungen, wo die Belastung durch Nebentätigkeit einsetzte, bei den Perioden ohne Nebentätigkeit erfolgt der Anstieg jedoch erst in der vierten Sitzung. Vp 24 scheint offenbar einen speziellen Lernprozeß durchzumachen, denn bei den letzten Sitzungen zeigt sie bei allen drei Bedingungen ähnlich günstige Werte wie die anderen Vpn.

Faßt man die Ergebnisse der für jede Sitzung pro Versuchsperson gemittelten Fehlerkurven zusammen, so kann man feststellen, daß die Unterschiede zwischen den Vpn in der Regel gering und unsystematisch sind. Eine Ausnahme davon bilden vor allem die Werte der Perioden ohne Rückmeldung. Dabei zeigen

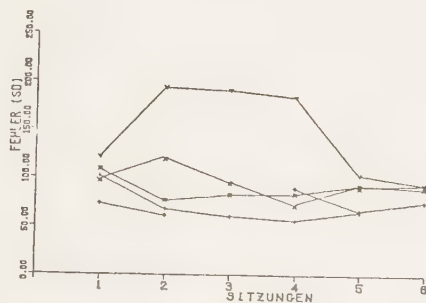
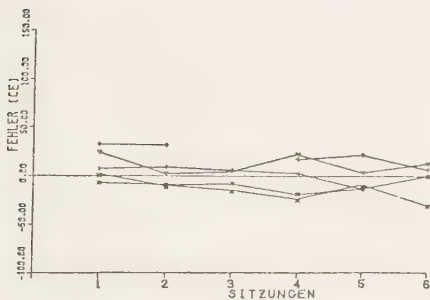
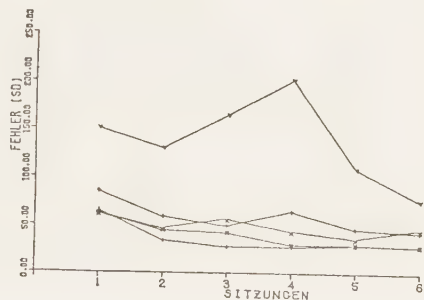
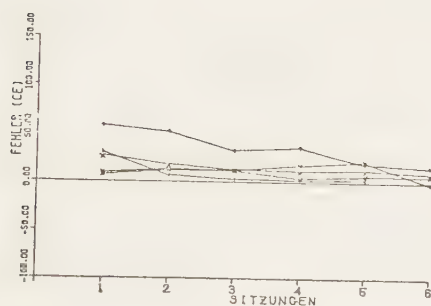
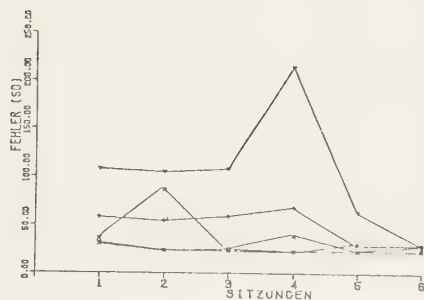
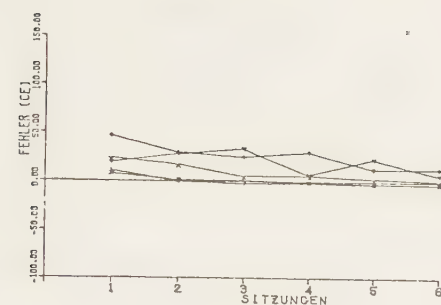


Abbildung 3.14

Mittlere konstante Fehler (CE) und Fehlerstandardabweichungen (SD) der fünf Vpn von Experimentalgruppe 2. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

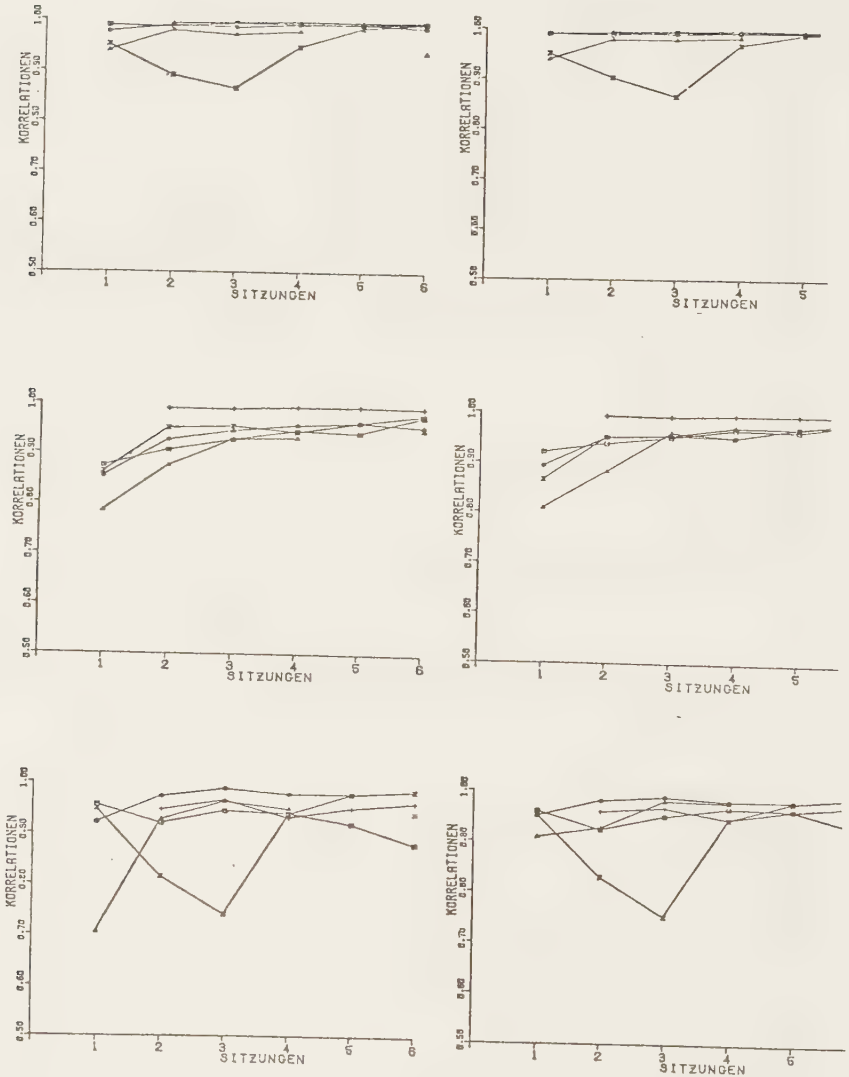
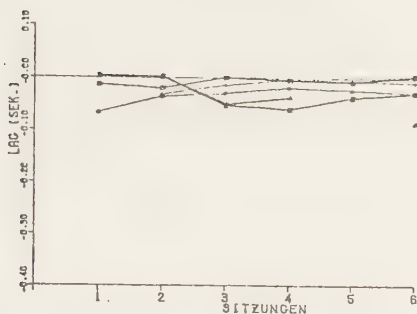


Abbildung 3.15

Mittlere Korrelationen ohne Zeitverschiebung (linke Spalte) und mittlere maximale Korrelationen (rechte Spalte) der fünf Vpn der Kontrollgruppe. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

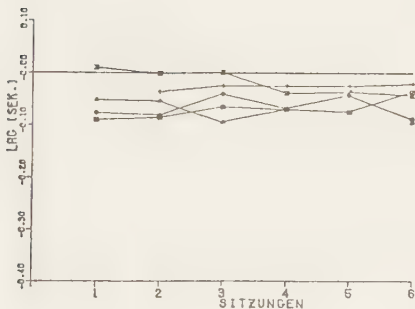
die Kurven einiger Von deutlich abweichende Verläufe.



Entscheidend ist, daß die Werte dieser Von wegen der geringen Gruppengrößen deutlich auf die Gruppenmittelwerte durchschlagen und somit einen Vergleich der drei Versuchsgruppen aufgrund ihrer Mittelwerte zweifelhaft erscheinen lassen.

3.3.2.2 Korrelationen

Auf dieser Ebene der Datenauswertung werden neben den Korrelationen ohne Zeitverschiebung auch die beiden anderen, schon erwähnten Variablen dargestellt: Das erste Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion sowie die entsprechende Zeitverschiebung.



Neben einem Vergleich der Kurvenscharen von jeweils fünf Von pro Gruppe mit den in Abschnitt 3.3.1.2 dargestellten Gruppenmittelwerten soll auch geprüft werden, welche Informationen die drei aus den Kreuzkorrelationsfunktionen gewonnenen Variablen zusätzlich zu den Fehlern beitragen können.



Abbildung 3.16

Mittlere Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen der fünf Von der Kontrollgruppe. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (oberes Bild), Tracking mit Nebentätigkeit (mittleres Bild) und Tracking ohne Rückmeldung (unteres Bild).

(a) Kontrollgruppe (Abbildungen 3.15 und 3.16)

Zunächst kann man feststellen, daß die maximalen Korrelationen nur unwesentlich höher ausfallen als die Korrelationen ohne Zeitverschiebung (Abbildung 3.15). Dementsprechend sind die Zeitverschiebungen durchweg gering (Abbildung 3.16). Systematische Trends sind nicht zu beobachten. Das Ausmaß der Zeitverschiebung scheint auch nicht von der Höhe der Korrelation ohne Zeitverschiebung abzuhängen.

Ein Vergleich der Korrelationsverläufe mit den Kurven für die Standardabweichungen der Fehler (Abbildung 3.12) zeigt die Ähnlichkeit beider Maße. Dies kann jedoch aufgrund des ähnlichen zugrundeliegenden mathematischen Kalküls nicht überraschen. Andererseits scheinen die Korrelationsverläufe die zugrundeliegenden Änderungen der Leistung differenzierter wiederzugeben. Bei den Perioden ohne Nebentätigkeit liegen einerseits drei Korrelationskurven sehr nahe beieinander, die entsprechenden Kurven für die Standardabweichungen zeigen demgegenüber deutlichere Unterschiede. Andererseits hebt sich die Korrelationskurve der Vp 8 deutlicher von den anderen ab, der Unterschied erscheint "optisch" größer als bei den Fehlerwerten. Dies ist nicht nur eine Frage des Ordinatenmaßstabes, der bewußt so gewählt wurde, daß die Spreizung der Ordinaten etwa vergleichbare Abbildungen liefert. Würde man nämlich den Maßstab der Korrelationsordinate vergrößern, so würden zwar die direkt beieinander liegenden Kurven etwas auseinander-rücken, der Abstand der Kurve von Vp 8 würde dadurch aber noch größer. Ähnliche Verhältnisse zeigen sich auch für die Perioden mit Nebentätigkeit bzw. ohne Rückmeldung.

(b) Experimentalgruppe 1 (Abbildung 3.17)

Da der Unterschied zwischen Korrelationen ohne Zeitverschiebung und maximalen Korrelationen auch bei den beiden Experimentalgruppen minimal ist, werden letztere im folgenden weggelassen.

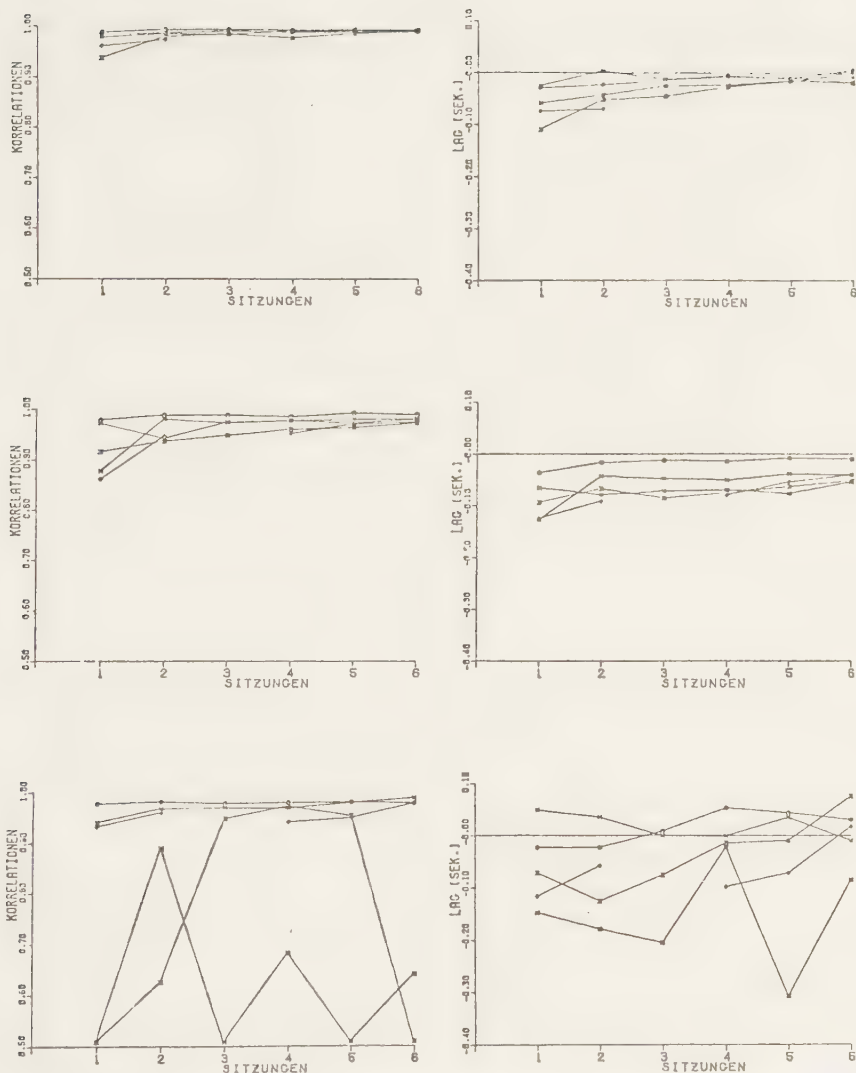


Abbildung 3.17

Mittlere Korrelationen ohne Zeitverschiebung (linke Spalte) und mittlere Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen der fünf Vpn von Experimentalgruppe 1. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

Abbildung 3.17 zeigt den Verlauf der mittleren Korrelationen ohne Zeitverschiebung sowie die mittleren Zeitverschiebungen der maximalen Korrelationen. Die Korrelationsverläufe liefern wieder die gleiche Information wie die entsprechenden Kurven der Standardabweichung. Diese Gruppe zeigt die besten Leistungen. Dies wurde durch die Fehlerwerte belegt und zeigt sich auch in den Korrelationen. Man kann bei dieser Gruppe am deutlichsten erkennen, daß eine Leistungsverbesserung mit einer Verminderung der Zeitverschiebungen einhergeht. Der zeitliche Verlauf der Führungsgröße ist offenbar deutlich besser zu erkennen als die aus mehreren überlagerten Sinusschwingungen bestehende Führungsgröße in der ersten Untersuchung. Dort zeigte sich, daß bei entsprechender Proportional-Transformation des Bediensignals die maximalen Korrelationen bei einer Zeitverschiebung von ca. 0,1 Sekunden auftraten. Bei der hier verwendeten Anordnung deuten maximale Korrelationen, die sich nicht bei einer Zeitverschiebung von Null ergeben, eher auf eine ungenügende Leistung hin.

(c) Experimentalgruppe 2 (Abbildung 3.18)

Der Verlauf der Korrelationen ohne Zeitverschiebung gibt keine Hinweise auf einen Einfluß der Belastung. Mit einer Ausnahme zeigen alle Vpn relativ regelmäßig ansteigende Korrelationsverläufe. Vp 24 weist deutliche Einbrüche bei den Sitzungen mit Nebentätigkeit auf. Darauf wurde bereits im Rahmen der Fehleranalyse eingegangen.

Die Zeitverschiebungen der maximalen Korrelationen geben erwartungsgemäß keine weiteren Aufschlüsse über den Lernprozeß.

Zusammenfassend kann man feststellen:

- (1) Korrelationen ohne Zeitverschiebung und maximale Korrelationen differieren nur unbedeutend.
- (2) Dementsprechend ist das Ausmaß der zeitlichen Verschiebung bis zur maximalen Korrelation gering.
- (3) Die Korrelationsdiagramme liefern keine wesentlichen Informationen, die über die Fehleranalyse hinausgehen.

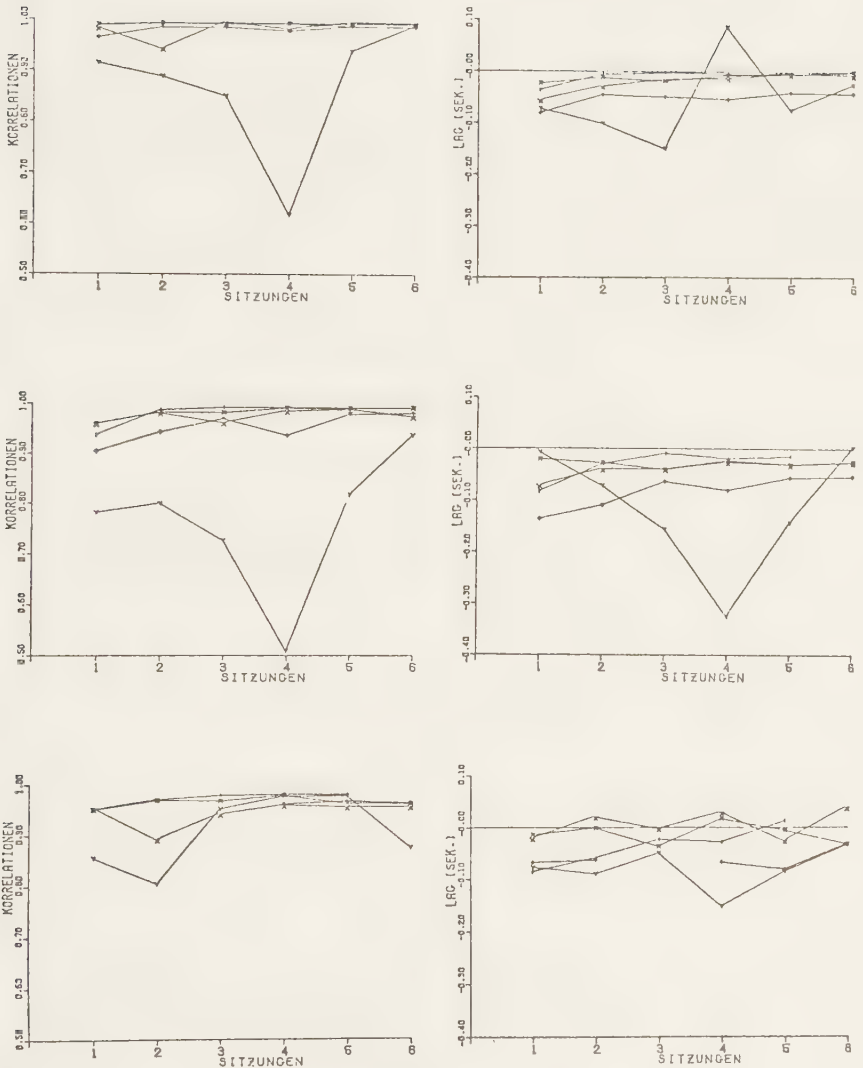


Abbildung 3.18

Mittlere Korrelationen ohne Zeitverschiebung (linke Spalte) und mittlere Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen der fünf Vpn von Experimentalgruppe 2. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

3.3.2.3 Zusammenfassung

Eine Datenanalyse auf der Ebene der jeweils fünf Vpn pro Versuchsgruppe ergab, daß die beim Vergleich der Gruppenmittelwerte beobachteten Unterschiede zwischen den Gruppen im wesentlichen auf extreme Werte einzelner Vpn zurückzuführen sind, die in ihren Sitzungsmittelwerten teilweise erheblich von den sonst relativ homogenen Werten der anderen Vpn abwichen. Es zeigte sich, daß auf dieser Analysenebene konstante und variable Fehler zur Beschreibung der Leistung ausreichen. Verschiedene Variablen der Kreuzkorrelationsfunktionen liefern keine zusätzlichen Informationen.

3.3.3 Vergleich des Leistungsverlaufes über die Perioden

Die Abbildungen in Abschnitt 3.3.2 enthielten die pro Versuchssitzung über die Perioden gemittelten Werte. Im folgenden werden diese Ergebnisse weiter aufgeschlüsselt und der Leistungsverlauf über einzelne Perioden dargestellt.

Pro Sitzung liegen Werte von 18 Perioden Tracking ohne bzw. mit Nebentätigkeit und neun Perioden Tracking ohne Rückmeldung vor (vgl. Abschnitt 3.1.4). Bei den folgenden graphischen Darstellungen ist es wegen dieser relativ großen Zahl von Datenpunkten nicht mehr möglich, die Verläufe für einzelne Vpn zu differenzieren. Da nur geprüft werden soll, ob die Mittelwerte in Abschnitt 3.3.2 repräsentativ für das Verhalten der Vpn während einzelner Perioden sind, ist das auch nicht unbedingt erforderlich.

Um gleiche Ordinatenmaße beibehalten zu können, mußten einige Extremwerte auf- bzw. abgerundet werden. Bei den Fehlerkurven wurden konstante Fehler auf 155 bzw. -99 und Standardabweichungen auf 255 gerundet; bei den Korrelationen auf 0,51 und bei den Zeitverschiebungen auf 0,11 bzw. -0,39 Sekunden. Da es sich nur um relativ wenige Perioden handelt und keine wesentlichen Informationen verloren gehen, scheint das zulässig.

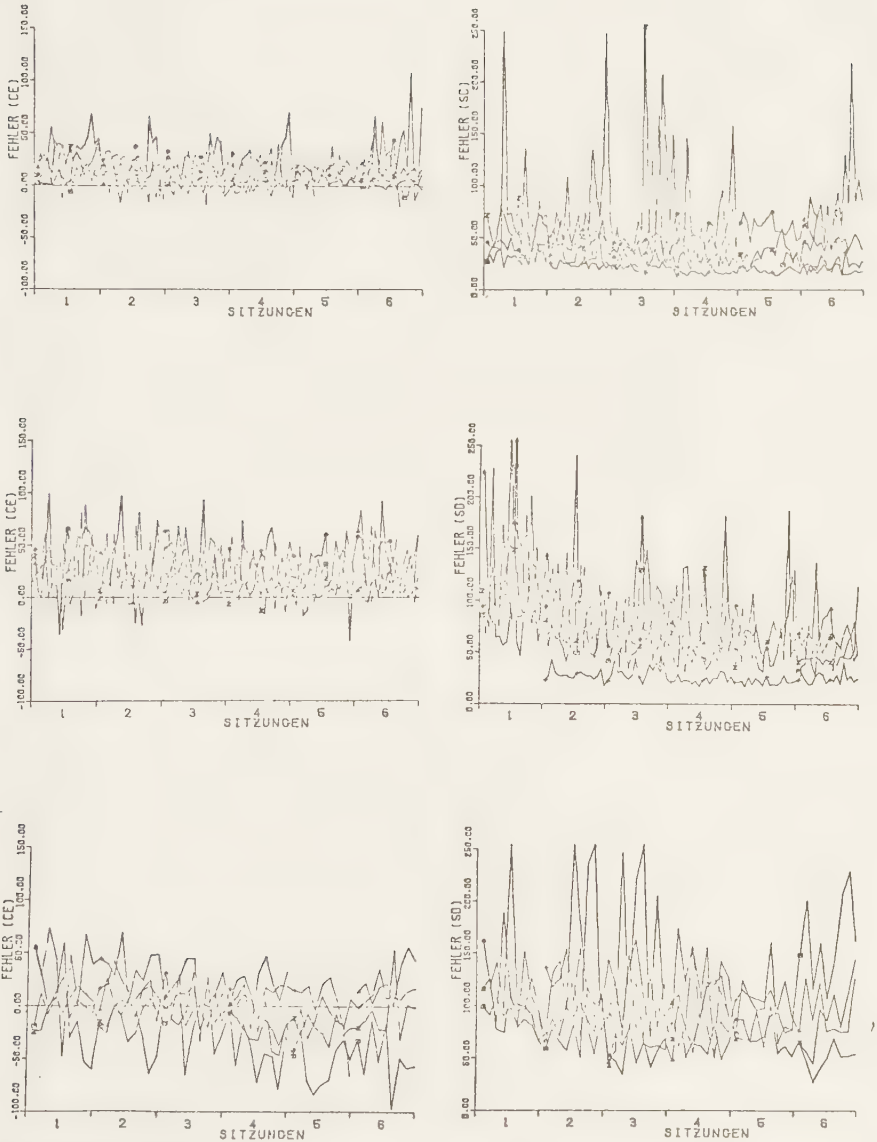


Abbildung 3.19

Konstante Fehler (CE) und Fehlerstandardabweichungen (SD) einzelner Perioden für die fünf Vpn der Kontrollgruppe. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

3.3.3.1 Fehler

(a) Kontrollgruppe (Abbildung 3.19)

Bei den konstanten Fehlern fällt auf, daß die intraindividuellen Unterschiede zwischen einzelnen Perioden den interindividuellen Differenzen entsprechen; die Werte einzelner Vpn weisen so große Schwankungen über die Perioden auf, daß die Unterschiede der gemittelten Werte in Abbildung 3.12 als zufällig angesehen werden müssen.

Das Ausmaß der Schwankungsbreite differenziert zwischen den Bedingungen mit/ohne Nebentätigkeit bzw. ohne Rückmeldung. Die Nebentätigkeit führt zu größeren Unterschieden zwischen einzelnen Perioden. Die Vpn bleiben jedoch mit dem Istwert in der Regel vor der Führungsgröße (positive Fehlerwerte); der Verlauf der Führungsgröße kann also gut antizipiert werden. Bei fehlender Rückmeldung sind die Abweichungen ihrem Betrag nach nicht viel größer als bei vorhandener Rückmeldung, es zeigt sich aber eine Verschiebung zu negativen Fehlerwerten (Nachhalt).

Die Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen treten bei den Standardabweichungen deutlicher in Erscheinung. Die Streubreite der Werte ist bei Tracking ohne Nebentätigkeit relativ gering, nur Vp 8 zeigt größere Schwankungen. Bei Tracking mit Nebentätigkeit ist die Streubreite zu Beginn des Lernprozesses deutlich größer als gegen Ende. Lernen schlägt sich also vor allem in einer verminderten Variation, d.h. einer Stabilisierung der Leistungen nieder. Eine Ausnahme stellt Vp 1 dar, die von Anfang an (Sitzung 1 fehlt) konstante und deutlich niedrigere Standardabweichungen aufweist. Bei Tracking ohne Rückmeldung zeigen sich unterschiedliche intraindividuelle Schwankungen; manche Vpn sind in ihren Leistungen relativ konstant, andere nicht. Es fällt auf, daß in der fünften Sitzung eine Konsolidierung der Standardabweichungen eintritt, in der sechsten und letzten Sitzung die Werte aber wieder ansteigen bzw. stärker schwanken.

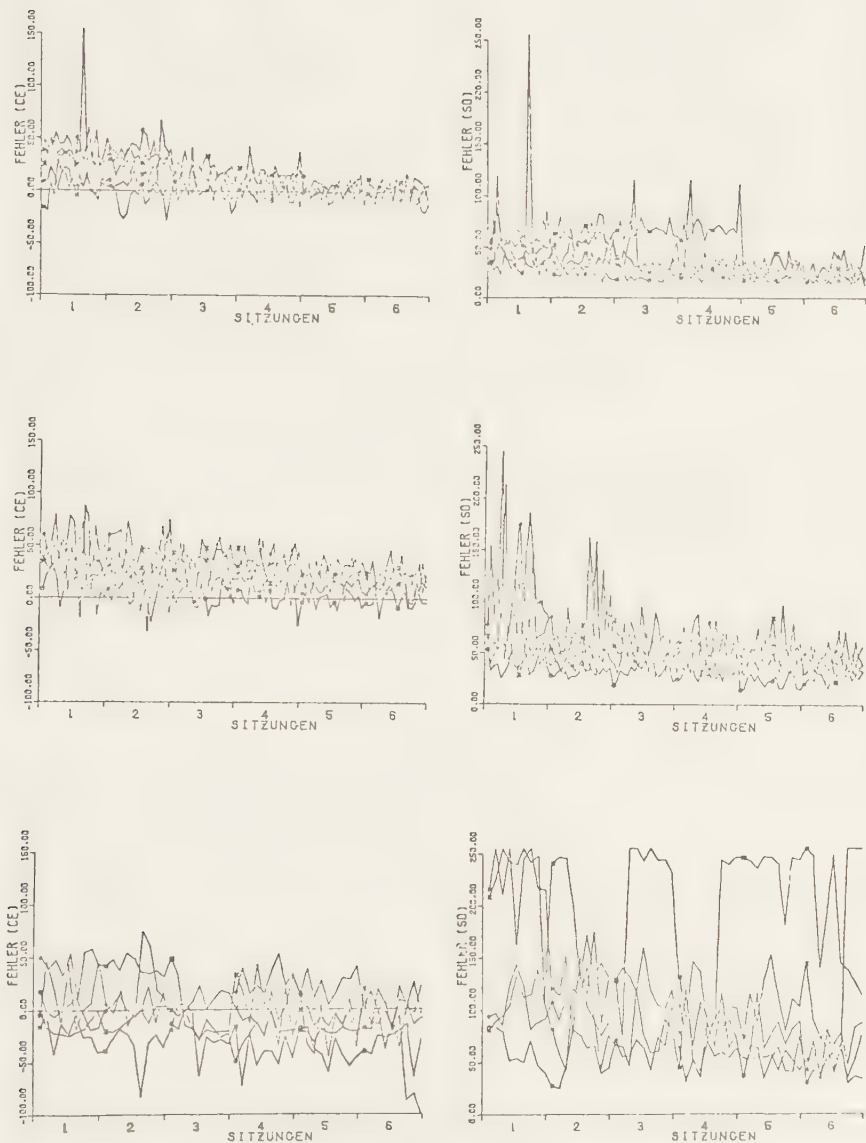


Abbildung 3.20

Konstante Fehler (CE) und Fehlerstandardabweichungen (SD) einzelner Perioden für die fünf Vpn der Experimentalgruppe 1.
Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile),
Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking
ohne Rückmeldung (untere Zeile).

(b) Experimentalgruppe 1 (Abbildung 3.20)

Experimentalgruppe 1 ist deutlich homogener als die Kontrollgruppe. Nur die Vp 16 liegt mit ihren Standardabweichungen bei Tracking ohne Nebentätigkeit und Tracking ohne Rückmeldung teilweise deutlich über denen der anderen Vpn. Bei dieser Gruppe zeigt sich ein deutlicherer Lernfortschritt als bei der Kontrollgruppe: Die konstanten Fehler nehmen stetig und systematisch ab, und die Variation der Standardabweichungen wird geringer. Das gilt allerdings nur bei vorhandener Rückmeldung. Fehlt die optische Rückmeldung des Istwertes, so ergibt sich ein ähnlich uneinheitliches Bild wie bei der Kontrollgruppe. Vor allem Vp 16 scheint bei dieser Bedingung überfordert zu sein.

In den vergangenen Abschnitten wurde wiederholt darauf hingewiesen, daß die Belastung durch eine Nebentätigkeit zu Beginn des Lernprozesses bei Gruppe E1 einen positiven Einfluß auf die spätere Trackingleistung hat. Die Unterschiede zur Kontrollgruppe sind in der ersten Sitzung gering, später zeigt die Experimentalgruppe 1 deutlich bessere Leistungen.

(c) Experimentalgruppe 2 (Abbildung 3.21)

Der zuletzt angesprochene Einfluß der Nebentätigkeit auf die Trackingleistung schlägt sich auch in den Werten der Gruppe E2 nieder. Die Leistungen sind in den letzten beiden Sitzungen deutlich besser und homogener als bei der Kontrollgruppe. Die Einführung der Nebentätigkeit in den Sitzungen drei und vier äußert sich in einem deutlichen Anstieg der Variabilität der konstanten Fehler bei allen drei Bedingungen. Fällt die Nebentätigkeit weg, so tritt eine merkliche Leistungsverbesserung ein. Bei Tracking ohne Rückmeldung gilt das in erster Linie für die Standardabweichungen.

Versuchsperson 24 fiel bereits in Abbildung 3.14 durch deutlich höhere Standardabweichungen gegenüber den anderen Vpn auf. In Abbildung 3.21 kann man nun erkennen, daß die Standardabweichungen nicht konstant auf einem höheren Niveau lie-

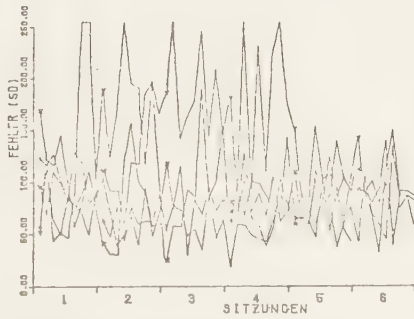
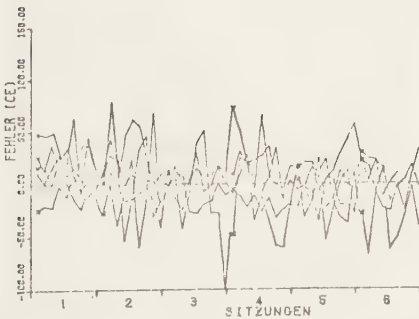
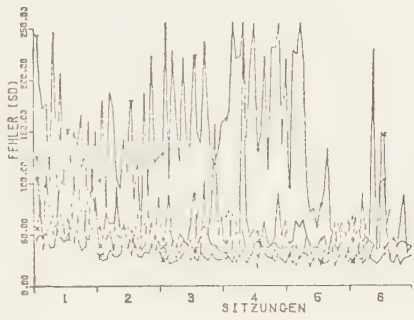
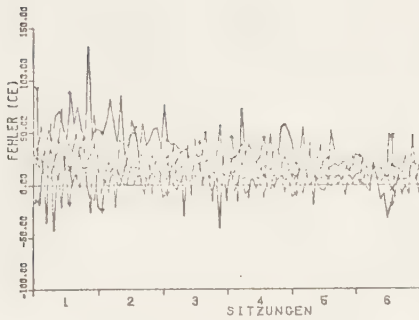
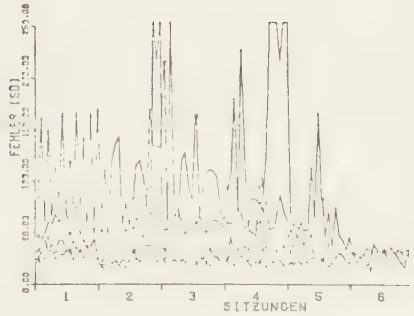
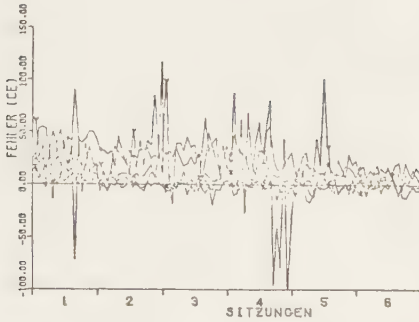


Abbildung 3.21

Konstante Fehler (CE) und Fehlerstandardabweichungen (SD) einzelner Perioden für die fünf Vpn der Experimentalgruppe 2.
Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile),
Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking
ohne Rückmeldung (untere Zeile).

gen, sondern nahezu rhythmische Schwankungen von einer Periode zur nächsten auftreten. Eine genauere Betrachtung zeigt, daß diese Schwankungen teilweise systematisch sind: Perioden mit bzw. ohne Nebentätigkeit folgen jeweils aufeinander. Weist die Vp bei einer Periode ohne Nebentätigkeit eine relativ geringe Standardabweichung auf, so ergibt sich für die folgende Periode mit Nebentätigkeit eine relativ hohe Standardabweichung und umgekehrt. Dieser Effekt ist in Abbildung 3.21 nicht klar zu erkennen, er ist aber auch nicht so eindeutig und durchgängig, daß eine gesonderte Darstellung nötig wäre. Man kann aus dieser Tendenz schließen, daß der Vp die während der registrierten Testblöcke erforderliche Umstellung auf geänderte Bedingungen von einer Periode zur nächsten nicht gut gelang. Man muß aber auch feststellen, daß die konstanten Fehler sich nicht stark von denen der anderen Vpn unterscheiden.

3.3.3.2 Korrelationen

Die Darstellung beschränkt sich wieder auf Korrelationen ohne Zeitverschiebung und Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen.

(a) Kontrollgruppe (Abbildung 3.22)

Bis auf Vp 8 weisen alle Vpn dieser Gruppe bei Tracking ohne Nebentätigkeit Korrelationen ohne Zeitverschiebung zwischen 0,95 und 1,0 auf, und zwar von der ersten bis zur letzten Sitzung. Die Kreuzkorrelationsfunktionen können daher auch nicht wesentlich ansteigen; das erste Maximum tritt bei sehr geringen Zeitverschiebungen auf. Interessant ist, daß die aus dem Rahmen fallenden, teilweise unter 0,5 liegenden Korrelationen von Vp 8 in den meisten Fällen nicht wesentlich von der maximalen Korrelation der betreffenden Periode abweichen, da nur geringe Zeitverschiebungen auftreten. Erst gegen Ende der letzten Sitzung deutet sich an, daß die Korrelationen ohne Zeitverschiebung nicht repräsentativ für die maximale Übereinstimmung von Führungsgröße und Istwert sind, da die Kreuzkorrelationsfunktion ihr Maximum erst bei einer relativ großen Zeitverschiebung erreicht. Die Vp weist bei

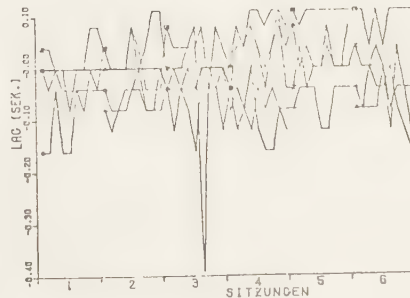
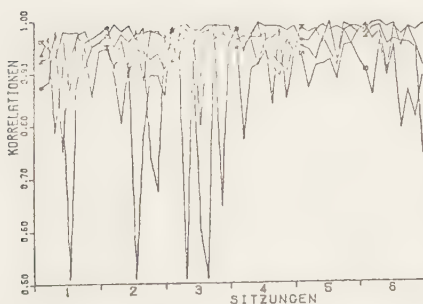
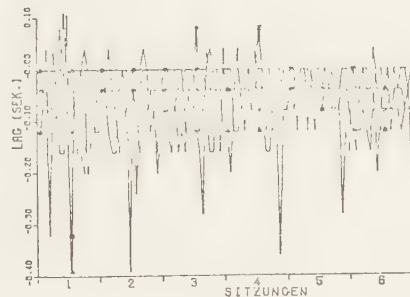
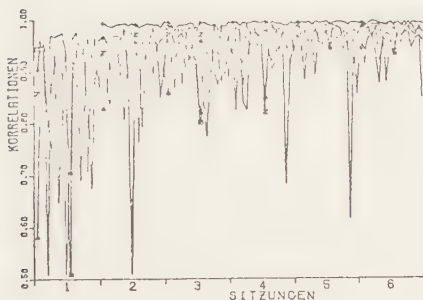
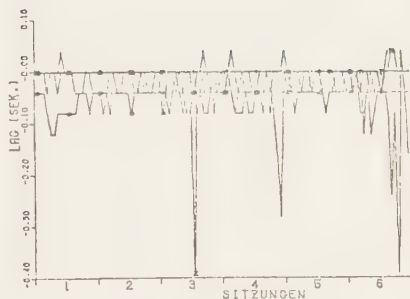
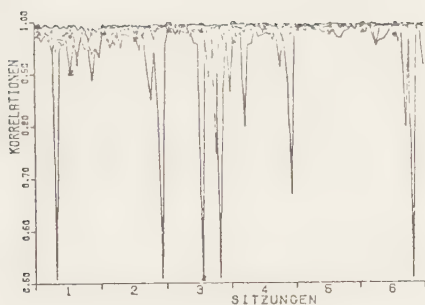


Abbildung 3.22

korrelationen ohne Zeitverschiebung (linke Spalte) und Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen einzelner Perioden für die fünf Vpn der Kontrollgruppe. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Benentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

diesen Perioden einen systematischen Vorhalt auf.

Tracking mit Nebentätigkeit führt zu erhöhter Variabilität der Korrelationen zwischen einzelnen Perioden; der Lernfortschritt äußert sich in einem Anstieg der Korrelationen über die Sitzungen bei gleichzeitiger Verminderung der Variabilität.

Bei fehlender Rückmeldung des Istwertes erhöht sich ebenfalls die Variabilität der Korrelationen. In den letzten beiden Sitzungen (vor allem der fünften) tritt eine starke Verminderung der Variabilität ein.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß die beiden aus den Kreuzkorrelationsfunktionen abgeleiteten Variablen keine zusätzlichen Informationen zu den Fehlerwerten liefern.

(b) Experimentalgruppe 1 (Abbildung 3.23)

Auch bei dieser Gruppe lassen die Korrelationskennwerte die gleichen Tendenzen erkennen wie die entsprechenden Fehlerwerte. Sie belegen, daß diese Gruppe in ihren Leistungen homogener ist und in den letzten Sitzungen bessere Trackingergebnisse aufweist als die Kontrollgruppe. Bei Tracking ohne Rückmeldung fällt jedoch die Vp 16 deutlich gegenüber den anderen Vpn ab. Dieser Vp gelingt es kaum, den Verlauf ihrer Bewegungen ohne visuelle Rückmeldung der Führungsgröße anzupassen.

(c) Experimentalgruppe 2 (Abbildung 3.24)

Ähnliches wie für die Gruppe E1 gilt auch für die Gruppe E2. Nur eine Vp (24) fällt deutlich ab; alle anderen zeigen gute und homogene Leistungen, selbst bei Ausblendung des Istwertes. Lernen unter Belastung in den Sitzungen drei und vier schlägt sich, wenn überhaupt, nur in den Werten der Vp 24 nieder. Die anderen Korrelationsverläufe weisen keine systematischen Veränderungen auf.

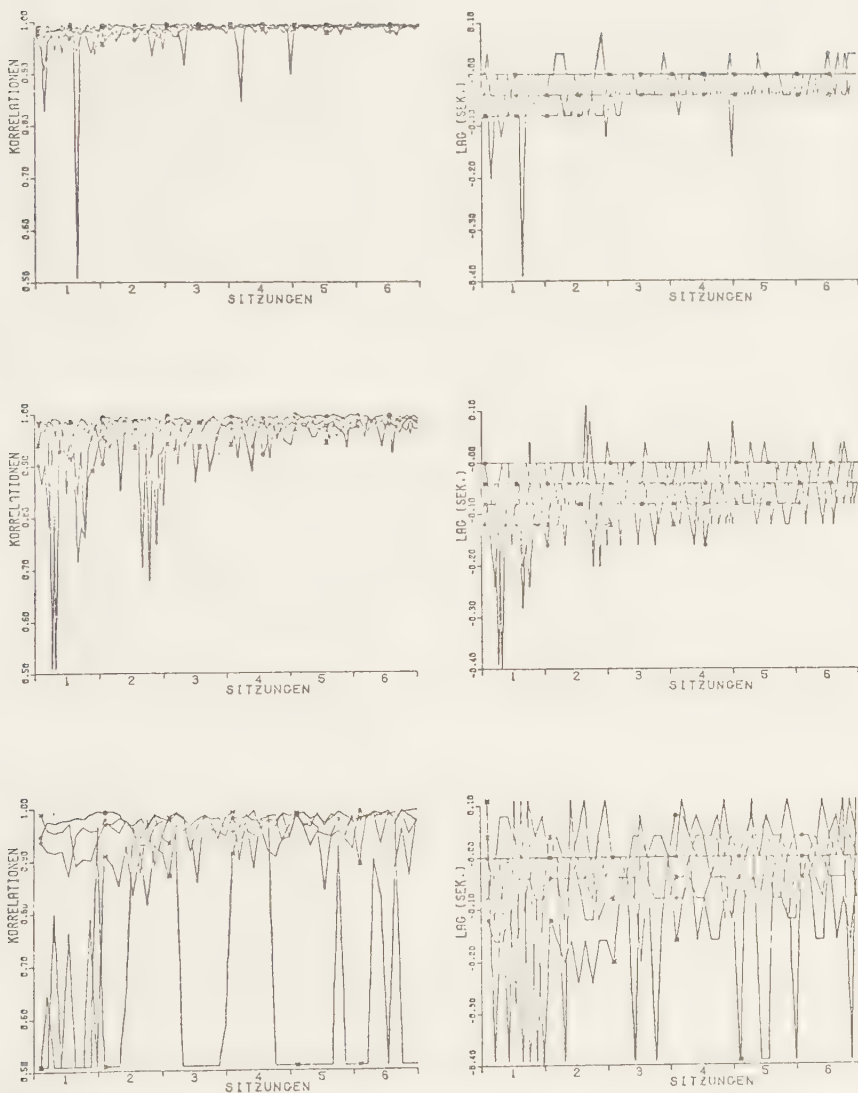


Abbildung 2.23

Korrelationen ohne Zeitverschiebung (linke Spalte) und Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen einzelner Perioden für die fünf Vpn der Experimentalgruppe 1.
Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

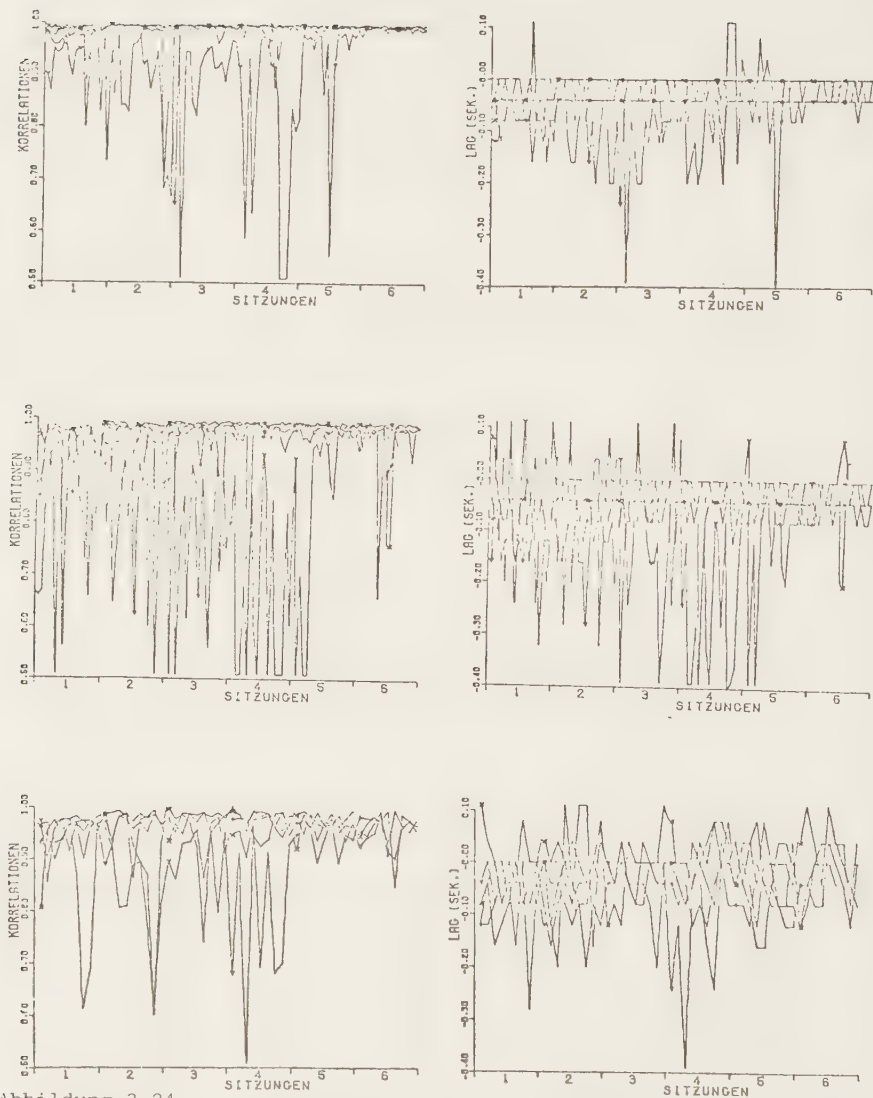


Abbildung 3.24

Korrelationen ohne Zeitverschiebung (linke Spalte) und Zeitverschiebungen des ersten Maximums der Kreuzkorrelationsfunktionen einzelner Perioden für die fünf Vpn der Experimentalgruppe 2. Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

3.3.3.3 Zusammenfassung

Die Darstellung der Verläufe über einzelne Perioden liefert keine weiteren Aufschlüsse über das Verhalten der Vpn. In Ergänzung zu den Darstellungen in Abschnitt 3.3.2 kann man lediglich erkennen, daß die inter- und intrasubjektive Variation über die Perioden mit zunehmender Übung abnimmt. Die durch relativ schlechte Leistungen in Abschnitt 3.3.2 aufgefallenen Vpn zeigen die größten Schwankungen über die Perioden; ihr sensomotorisches Verhalten stabilisiert sich in weit geringerem Maße als bei den anderen Vpn. Die Kurven lassen jedoch keine Rückschlüsse auf zugrundeliegende Ursachen zu.

Es bestätigt sich erneut, daß die Kennwerte der Kreuzkorrelationsfunktionen keine Hinweise liefern, die nicht bereits in den Fehlerwerten enthalten sind.

3.3.4 Vergleich ausgewählter Durchgänge

Auf dieser vierten Ebene der Datenanalyse soll veranschaulicht werden, welches konkrete motorische Verhalten der Vpn den bereits dargestellten Ergebnissen zugrunde liegt.

Ausgangsdaten zur Berechnung der Fehlermaße und der Kreuzkorrelationsfunktionen waren die Verläufe von Führungsgröße und Istwert. Die Verläufe und die daraus berechneten Werte werden daher jeweils in einer Abbildung zusammengefaßt. Bei sechs Sitzungen und jeweils neun Durchgängen, die registriert wurden, wären das für 15 Vpn insgesamt 810 Einzeldarstellungen. Wir beschränken uns daher auf zwei Vpn pro Versuchsgruppe und jeweils drei Durchgänge pro Sitzung: Ein Durchgang Tracking ohne Nebentätigkeit, ein Durchgang Tracking mit Nebentätigkeit und ein Durchgang Tracking ohne Rückmeldung. Für Tracking ohne bzw. mit Nebentätigkeit bieten sich die beiden ersten registrierten Durchgänge an; für Tracking ohne Rückmeldung wird der neunte und letzte Durchgang einer Sitzung genommen, da nach zwei vorangegangenen Durchgängen ohne Rückmeldung eine gewisse Eingewöhnung stattgefunden hat.

Pro Versuchsbedingung wird eine Vp mit guten Trackingleistungen und eine mit relativ schlechten Trackingleistungen herausgegriffen. Da die Leistungen der "guten" Vpn keine wesentlichen Veränderungen über die Sitzungen aufweisen, beschränken wir uns bei diesen Vpn auf die erste und letzte Sitzung. Für die "schlechten" Vpn werden alle Sitzungen dargestellt.

Jeweils zwei Sitzungen werden auf einer Seite zusammengefaßt. Die Durchgänge einer Sitzung sind spaltenweise geordnet; die oberen beiden Abbildungen stellen die ersten beiden Durchgänge dar (Tracking ohne bzw. mit Nebentätigkeit, je nach Gruppenhälfte) und die untere Abbildung den letzten Durchgang (immer abwechselnde Perioden mit und ohne Rückmeldung).

Die einzelnen Abbildungen sind folgendermaßen aufgebaut: Im oberen Teil sind die Verläufe von Führungsgröße und Istwert dargestellt; bei Tracking mit Nebentätigkeit werden direkt darüber die Zeitpunkte der Signale durch senkrechte Striche gekennzeichnet. Im mittleren Teil der Abbildungen ist der Verlauf der Kreuzkorrelationsfunktionen für Zeitverschiebungen von -2 bis +2 Sekunden dargestellt, unmittelbar darunter der Wert der Kreuzkorrelationsfunktion ohne Zeitverschiebung. Im unteren Teil sind die vier Fehlervariablen enthalten sowie bei Tracking mit Nebentätigkeit die Gesamtzahl der Signale (NSIG) und die Zahl richtiger (NR), falscher (NF), ausgelassener (NAUSG) und zu kurzer (NKURZ) Reaktionen. Reaktionen wurden als zu kurz eingestuft, wenn die Reaktionszeit kleiner als 100 msec war.

3.3.4.1 Kontrollgruppe

Versuchsperson 1 zeigt die mit Abstand besten und konstantesten Leistungen der Kontrollgruppe. Leider fehlen bei dieser Vp die Daten der ersten Sitzung. In Abbildung 3.25 sind daher die ausgewählten Durchgänge der Sitzungen zwei und sechs gegenübergestellt.

Man kann erkennen, daß die Kurven von Führungsgröße und Istwert bei Tracking ohne Nebentätigkeit an keiner Stelle deut-

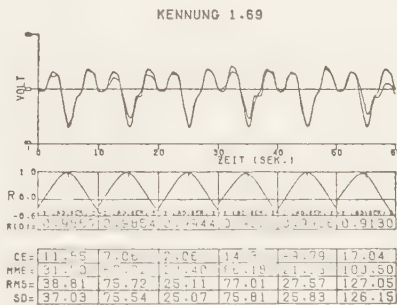
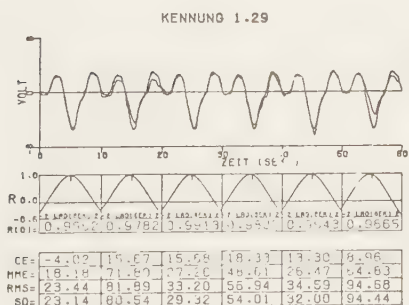
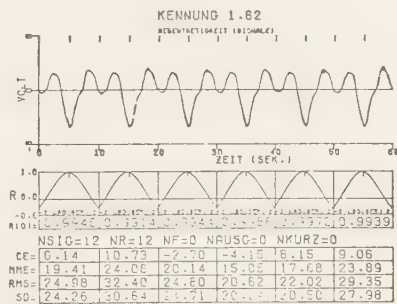
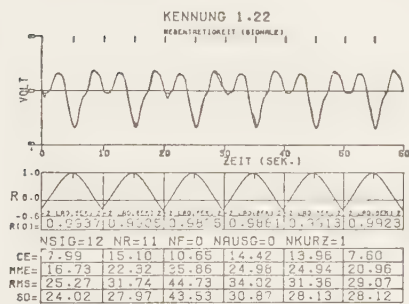
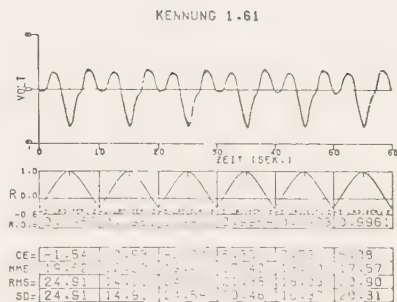
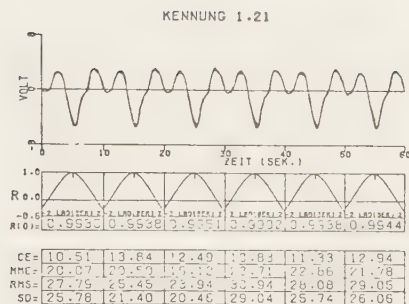


Abbildung 3.25

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungseröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 1, Sitzungen 2 (linke Spalte) und 6 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

lich voneinander abweichen. Tracking bei gleichzeitiger Nebentätigkeit führt auch nur zu minimalen Abweichungen. Dabei wird die Nebentätigkeit perfekt ausgeführt: Nur in Sitzung zwei ist eine Reaktion zu kurz, alle anderen sind richtig. Vp 1 erhielt während der sechs Perioden 12 Reize, also alle fünf Sekunden ein zu beantwortendes Signal. Das ist zwar die geringste Frequenz aller ausgewählten Vpn, scheint jedoch keine ausreichende Erklärung für die guten Leistungen zu sein, da die mit Abstand schlechteste Vp 24 auch nur 15 Reize während eines Durchgangs beantworten mußte (vgl. Abbildung 3.30).

Tracking ohne Rückmeldung führt zu einer deutlichen Verkleinerung der Bewegungsamplitude. Die zeitliche Einteilung ist jedoch der Führungsgröße ausgezeichnet angepaßt: Maxima, Minima und Nulldurchgänge stimmen bei Führungsgröße und Istwert überein. Die Vp hat also offensichtlich ein Bewegungsprogramm ausgebildet, das in zeitlicher Hinsicht der Führungsgröße angepaßt ist. Die Bewegungsamplitude, die bei fehlender Rückmeldung in erster Linie durch propriozeptive Reize gesteuert wird, fällt dagegen gering aus. Die "Automatisierung" der Bewegungen oder das Entstehen eines "motorischen Programms" besteht also (wenigstens bei dieser Versuchsanordnung und dieser Vp) in der zeitlichen Steuerung des Bewegungsablaufes; die "Internalisierung" der Bewegungsamplitude ist ungenügend.

Die Kreuzkorrelationsfunktionen weisen einen regelmäßigen Abfall mit zunehmender positiver oder negativer Zeitverschiebung auf. Da wegen der guten Trackingleistung die maximalen Korrelationen bei einer Zeitverschiebung von Null oder nahe Null auftreten, hängt die Form der Kreuzkorrelationsfunktion, d.h. die Steilheit des Abfalles, von der Periodik der Führungsgröße ab. Die wesentlichen Informationen der Kreuzkorrelationsfunktionen wurden bereits in den vergangenen Abschnitten dargestellt, daher kann im folgenden auf eine weitere Betrachtung verzichtet werden.

Zwei der vier Fehlermaße, konstanter Fehler (CE) und Standardabweichung (SD), wurden bereits besprochen. Die Unterschiede zwischen mittlerem quadratischen Fehler (RMS) und Standard-

abweichung sind gering. Das ist nicht verwunderlich, wenn man die Berechnungsformeln betrachtet (Abschnitt 1.2.3): Die Standardabweichung des Fehlers ergibt sich aus der Wurzel der mittleren quadrierten Abweichungen einzelner Fehler vom Fehlermittelwert. Der mittlere quadratische Fehler stellt die Wurzel der mittleren Abweichung einzelner Fehler von Null dar. Beide Werte sind also identisch, wenn der Mittelwert der Fehler gleich Null ist. Je stärker der Fehlermittelwert von Null abweicht, desto stärker unterscheiden sich quadratischer Fehler und Standardabweichung. Das kann man an den Fehlerwerten in Abbildung 3.26 verifizieren. Der konstante Fehler ist zwar wegen der speziellen Berechnung nicht mit dem Fehlermittelwert identisch, ihm aber doch sehr ähnlich. Bei größeren konstanten Fehlern (vor allem bei Tracking ohne Rückmeldung) unterscheiden sich quadratischer Fehler und Standardabweichung stärker als bei kleineren konstanten Fehlern.

Mittlere absolute Fehler (MME) stellen die mittlere Summe der absoluten Abweichungen von Führungsgröße und Istwert dar. Sie sagen also nichts über Vor- oder Rückhalte aus, sondern geben an, wie weit die Kurven im Durchschnitt voneinander abweichen. Bei Vp 1 liegen die absoluten Fehler jeweils um einen relativ konstanten Betrag unter den quadratischen Fehlern und Standardabweichungen. Das liegt vor allem daran, daß die Kurven von Führungsgröße und Istwert nur minimal voneinander abweichen. Bei größeren Abweichungen steigen quadratische Fehler und Standardabweichungen im Verhältnis stärker an, da bei diesen Werten die Quadrate der Abweichungen in die Berechnung eingehen, beim absoluten Fehler jedoch nur die einfachen Abweichungen. Dieser Effekt wird bei den folgenden Abbildungen deutlicher werden.

Die schlechtesten Ergebnisse der Kontrollgruppe weist Vp 8 auf. Daher sind in Abbildung 3.26 die ausgewählten Durchgänge für alle Sitzungen dargestellt.

Bei Tracking ohne Nebentätigkeit findet der größte Lernfortschritt von Sitzung eins zu Sitzung zwei statt. Die Bewegungen sind in der ersten Sitzung sehr unregelmäßig, werden

aber ab der zweiten Sitzung gleichmäßiger. Deutliche Abweichungen an den Wendepunkten der Führungsgröße bleiben bis zur letzten Sitzung erhalten.

Die Nebentätigkeit stellt für diese Vp offenbar eine wesentlich stärkere Belastung dar als für Vp 1, denn die Trackingleistungen sind bei gleichzeitiger Nebentätigkeit deutlich schlechter als ohne Nebentätigkeit. Eine zeitliche Zuordnung von Reizen bei der Nebentätigkeit und Abweichungen bei der Trackingtätigkeit ist zwar aufgrund der graphischen Darstellungen kaum möglich, jedoch kann man an einigen Stellen eine verstärkte Regelabweichung unmittelbar nach einem Reiz beobachten (vor allem bei den Sitzungen zwei und drei). Es kommt hinzu, daß die Leistungen in der Wahlreaktionsaufgabe bis zum Schluß relativ schlecht sind. Es werden zwar keine Signale ausgelassen, die Zahl falscher oder zu kurzer Reaktionen ist aber sehr groß.

Bei fehlender Rückmeldung ist Vp 8 überraschenderweise besser als Vp 1 in der Lage, die Amplituden ihrer Bewegungen derjenigen der Führungsgröße anzupassen. Dafür ist aber der Bewegungsverlauf, vor allem bei den Sitzungen zwei bis vier, wesentlich unregelmäßiger als bei vorhandener Rückmeldung. In den beiden letzten Sitzungen sind die Leistungen ohne Rückmeldung ähnlich gut (oder schlecht) wie bei vorhandener Rückmeldung; diese Vp zeigt also einen deutlichen Lernfortschritt.

3.3.4.2 Experimentalgruppe 1

Vp 20 zeigt bei der Experimentalgruppe 1 die besten Trackingleistungen. Abbildung 3.27 verdeutlicht, daß diese Vp jedoch nicht ganz so gut ist wie Vp 1. Vor allem bei Tracking mit Nebentätigkeit treten auch in der letzten Sitzung deutliche Abweichungen von Führungsgröße und Istwert auf. Die Leistung in der Reaktionsaufgabe ist gut.

Auch ohne visuelle Rückmeldung des Istwertes kann diese Vp von Anfang an ein der Führungsgröße gut entsprechendes Bewegungsmuster produzieren. Im Gegensatz zu Vp 1 sind keine

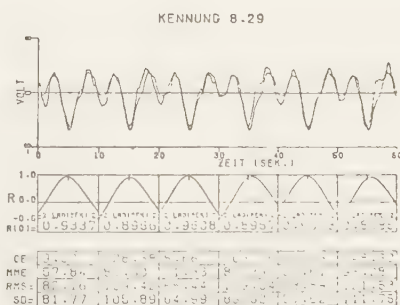
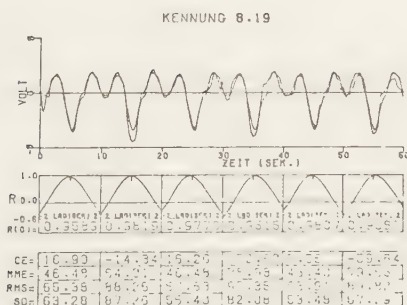
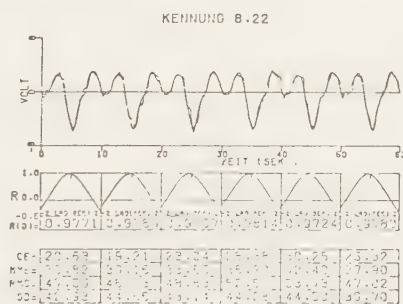
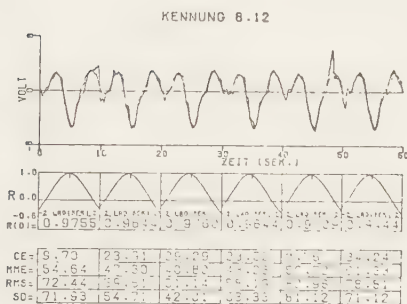
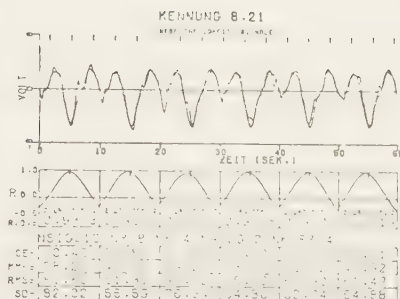
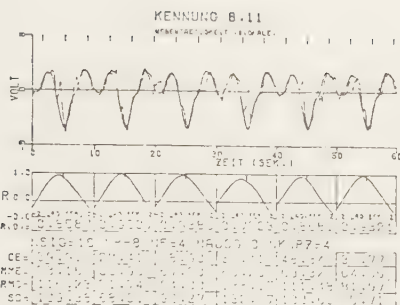


Abbildung 3.26

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 8, Sitzungen 1 (linke Spalte) und 2 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (mittlere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (obere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

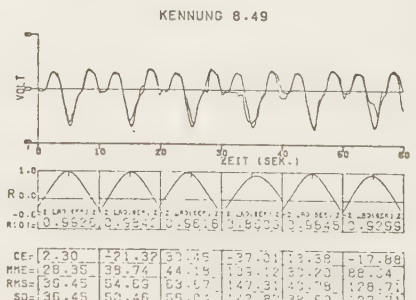
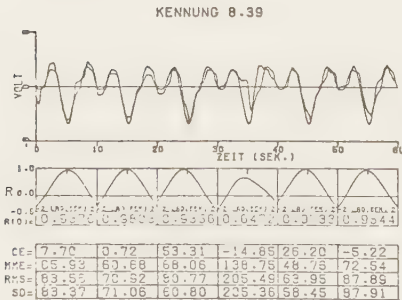
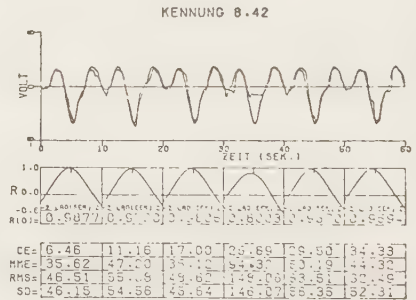
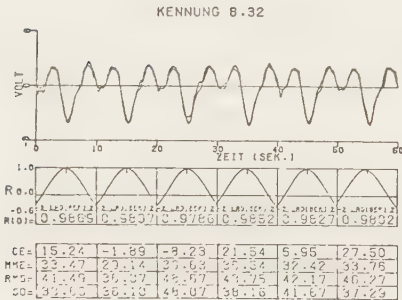
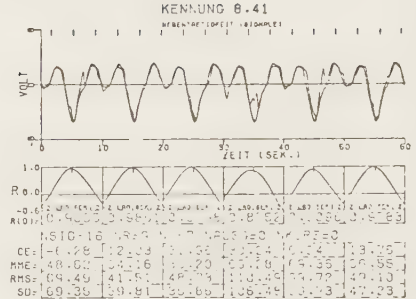
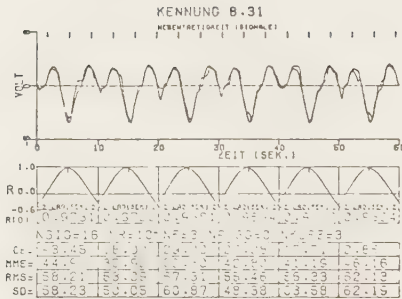


Abbildung 3.26 (Fortsetzung)

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 8, Sitzungen 3 (linke Spalte) und 4 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (mittlere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (obere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

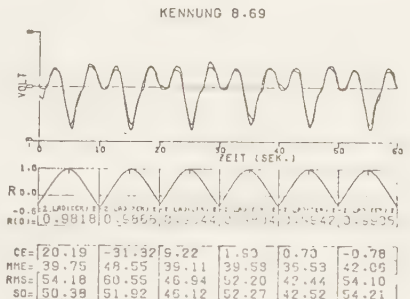
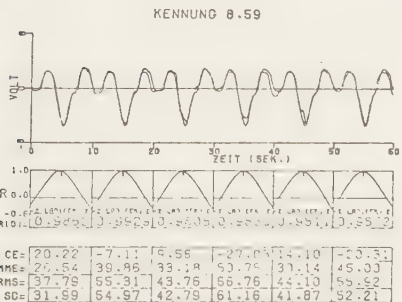
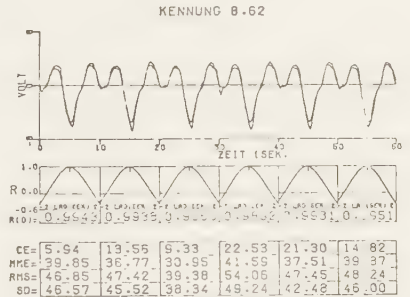
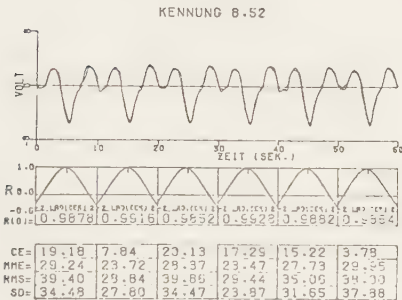
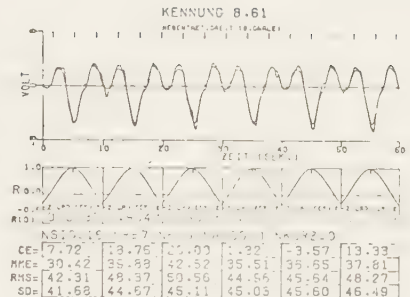
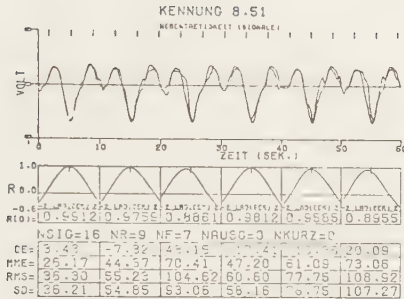


Abbildung 2.26 (Fortsetzung)

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 8, Sitzungen 5 (linke Spalte) und t (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (mittlere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (obere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

systematischen Einschränkungen der Amplitude zu beobachten.

Vp 16 ist die "schlechteste" Vp dieser Gruppe. Ihre Trackingleistungen zeichnen sich durch starke Amplitudenabweichungen an den Extrempunkten der Führungsgröße aus (Abbildung 3.28). Erstaunlicherweise ist das (vor allem bei den Sitzungen drei und vier) bei Tracking ohne Nebentätigkeit stärker der Fall als bei Tracking mit Nebentätigkeit. Die zeitliche Steuerung der Bewegungen ist demgegenüber bei allen Sitzungen gut angepaßt.

Bei Tracking mit Nebentätigkeit hängt die Güte der Trackingleistung von der Konzentration auf die Nebentätigkeit ab: Bei guten Leistungen in der Nebentätigkeit (Sitzungen drei und vier) stimmen die Kurven weniger gut überein als bei relativ schlechten Leistungen in der Nebentätigkeit (Sitzungen fünf und sechs).

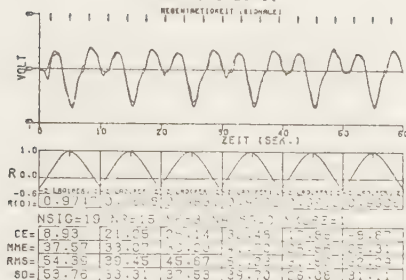
Vp 16 war vor allem deswegen als "schlecht" aufgefallen, weil sie bei den Perioden ohne Rückmeldung schlechtere Trackingleistungen zeigte als die anderen Vpn dieser Gruppe. Erst auf dieser Ebene der Datenanalyse kann man klar erkennen, woran das liegt: Die Vp stellt ihre Bewegungen weitgehend ein, sobald der Istwert nicht mehr sichtbar ist. Versucht sie einmal der Führungsgröße zu folgen, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Vp 1: Die zeitliche Einteilung stimmt relativ gut, die Amplitude ist aber stark eingeschränkt.

Ein Einfluß der Nebentätigkeit während der Übungsblöcke in den Sitzungen eins und zwei ist weder bei Vp 20 noch bei Vp 16 zu erkennen.

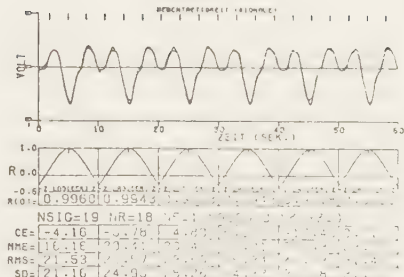
3.3.4.3 Experimentalgruppe 2

Vp 23 zeigt über alle Sitzungen relativ gute Trackingleistungen (Abbildung 3.29). Die Nebentätigkeit wirkt offenbar nur am Anfang der ersten Sitzung leistungsmindernd, danach ist kein deutlicher Unterschied zwischen den Trackingleistungen mit und ohne Nebentätigkeit festzustellen.

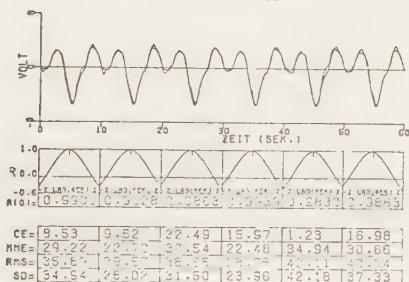
KENNUNG 20.11



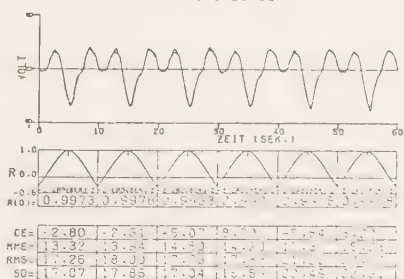
KENNUNG 20.61



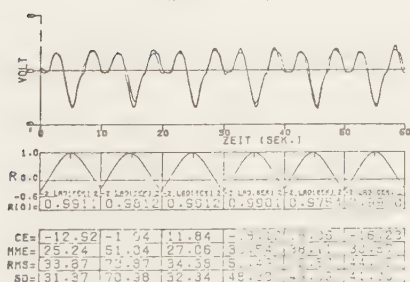
KENNUNG 20.12



KENNUNG 20.62



KENNUNG 20.19



KENNUNG 20.69

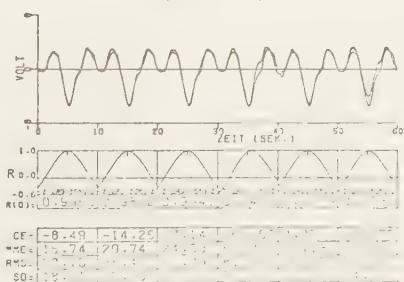


Abbildung 3.27

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für V_p 20, Sitzungen 1 (linke Spalte) und 6 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (mittlere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (obere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

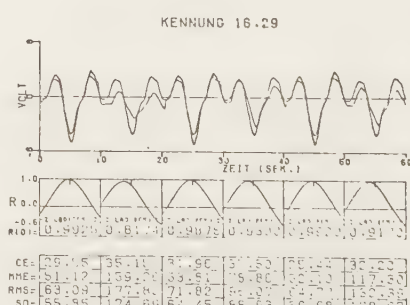
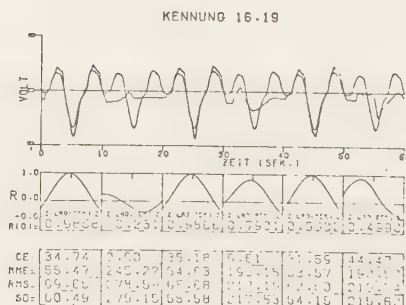
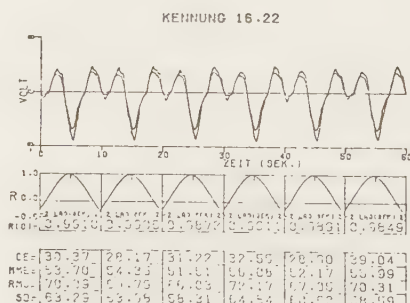
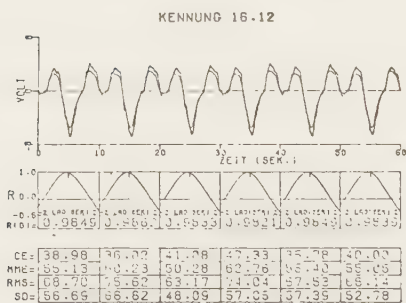
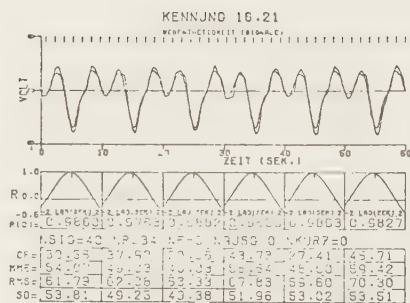
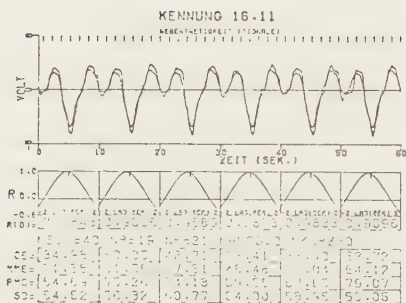


Abbildung 3.28

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 16, Sitzungen 1 (linke Spalte) und 2 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (mittlere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (obere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

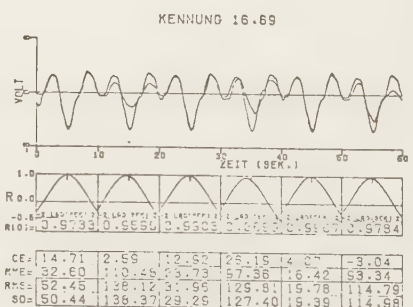
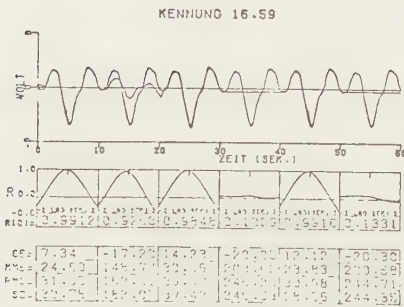
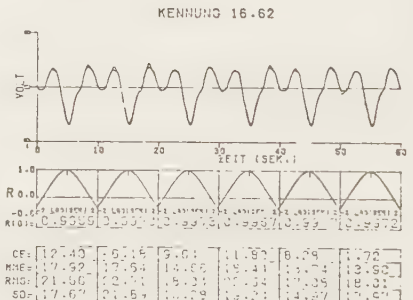
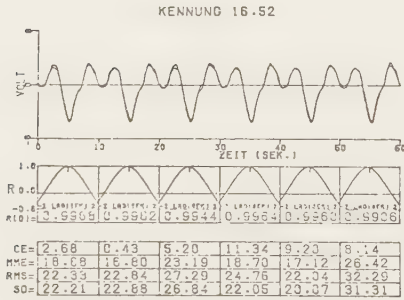
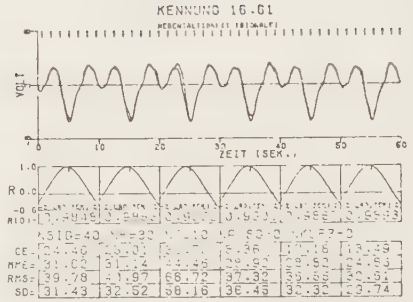
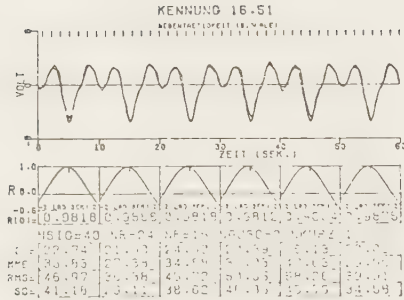


Abbildung 3.28 (Fortsetzung)

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für V_p 16, Sitzungen 5 (linke Spalte) und 6 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (mittlere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (obere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

Bei fehlender Rückmeldung ergibt sich wiederum eine gute zeitliche Einteilung der Bewegungen und eine Einschränkung der Amplituden.

Vp 24 war durch schlechte Leistungen aufgefallen. In Abbildung 3.30 kann man erkennen, wie die Bewegungen dieser Vp praktisch aussahen. Die Abweichungen von Führungsgröße und Istwert sind teilweise so groß, daß man sich fragen muß, ob diese Vp bewegungsgestört war, die Instruktion und damit ihre Aufgabe nicht verstanden hatte oder außer an der Bezahlung kein Interesse am Versuch hatte. Betrachtet man die beiden letzten Sitzungen, so kann man wohl die ersten beiden Hypothesen zurückweisen: Die Vp ist bei allen Versuchsbedingungen in der Lage, über mehrere Perioden eine gute Übereinstimmung von Führungsgröße und Istwert zu erzielen.

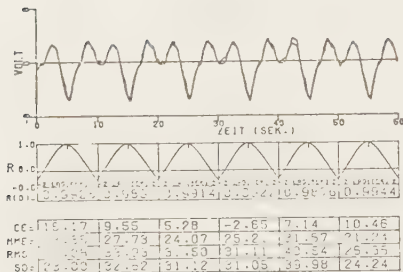
Besonders auffällig ist der teilweise bis zu 20 Sekunden dauernde Bewegungsstillstand bei Tracking mit Nebentätigkeit, obwohl nur 15 Signale in einem Zeitraum von 60 Sekunden zu beantworten waren. Es kommt hinzu, daß dieses Anhalten der Bewegung vor allem bei den Sitzungen drei und vier auftritt, wo die Vp ja unter Belastung übte, d.h. vor dem registrierten Durchgang bereits einen Übungsblock Tracking mit Nebentätigkeit absolviert hatte und also mit der Aufgabe vertraut war. Eine generelle Überforderung kann auch nicht die Ursache gewesen sein, da in den beiden ersten Sitzungen, wo ohne Belastung geübt worden war, kein oder nur ein kurzfristiger Bewegungsstillstand auftrat.

Selbst bei der Ausblendung der Rückmeldung führt Vp 24 ihre Bewegungen fort, wenn auch zunächst mit schlechtem Ergebnis. In den letzten beiden Sitzungen sind jedoch die Leistungen auch ohne Rückmeldung gut; selbst diese sonst sehr schlechte Vp hat also den Bewegungsverlauf internalisiert.

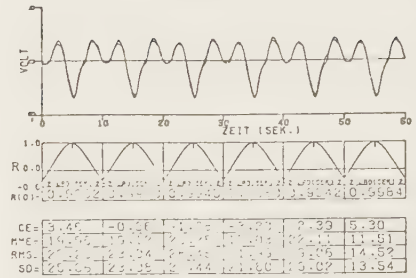
3.3.4.4 Zusammenfassung

Auf dieser Ebene der Datenanalyse wurden ausgewählte Versuchsdurchgänge betrachtet, und zwar pro Sitzung die ersten Durchgänge ohne bzw. mit Nebentätigkeit sowie der dritte und letzte

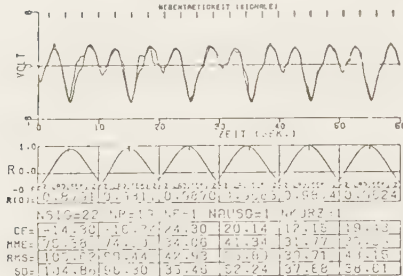
KENNUNG 23.11



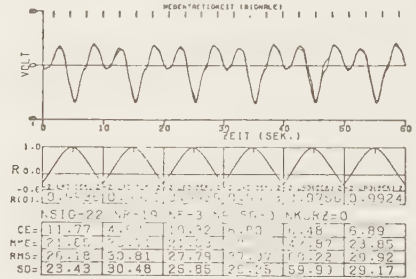
KENNUNG 23.61



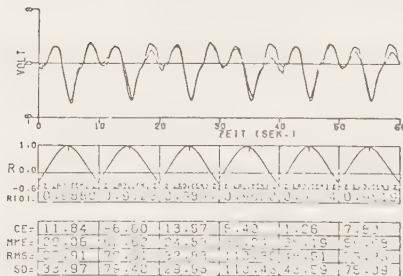
KENNUNG 23.12



KENNUNG 23.62



KENNUNG 23.19



KENNUNG 23.69

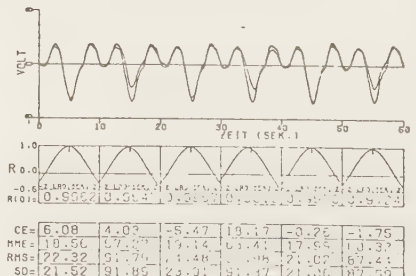
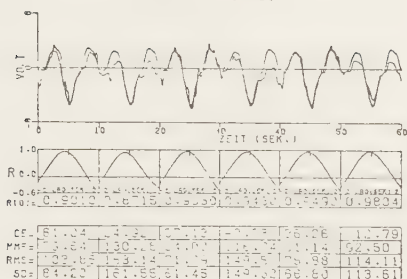


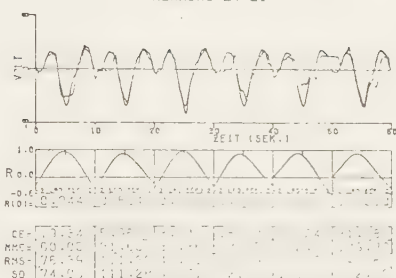
Abbildung 3.29

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 23, Sitzungen 1 (linke Spalte) und 6 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

KENNUNG 24.11

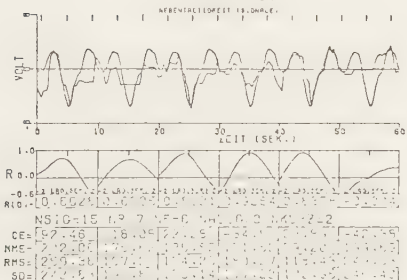


KENNUNG 24-21



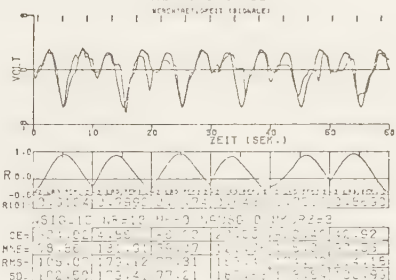
KENNUNG 24.12

00000

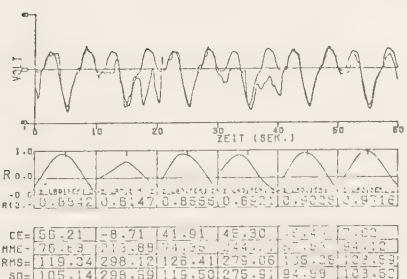


KENNUNG 24.22

MORCHART, JEFF (BIOGRAPH)



KENNUNG 24-19



KENNUNG 24.29

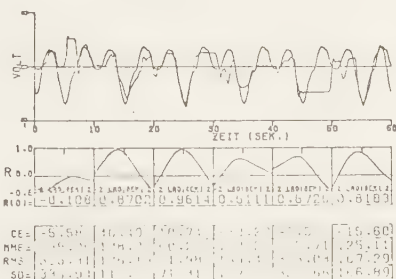
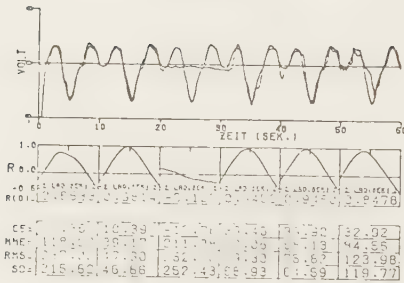


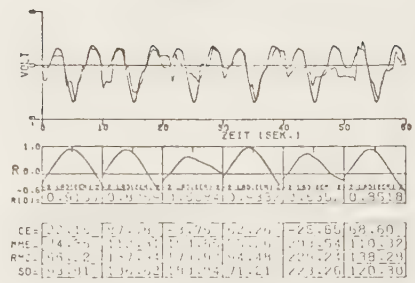
Abbildung 3.30

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 24, Sitzungen 1 (linke Spalte) und 2 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

KENNUNG 24.31

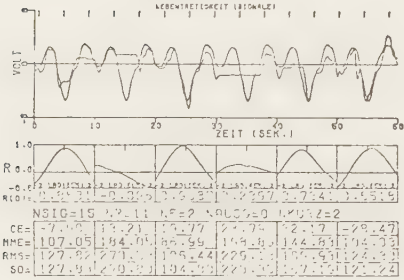


KENNUNG 24.41



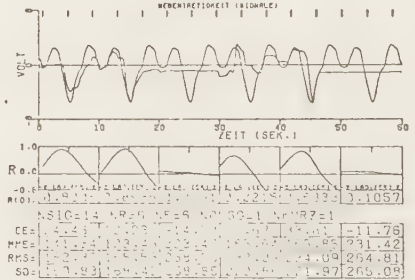
KENNUNG 24.32

LEBENSSTÄDT (KREIT) (BIOGRAPH)

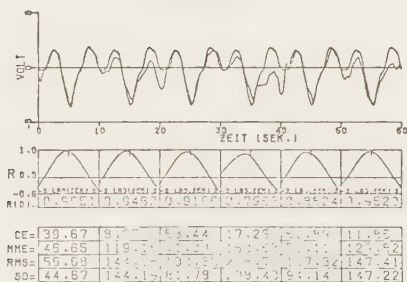


KENNUNG 24.42

MEMORANDUM FOR THE DIRECTOR (BIOGRAPHY)



KENNUNG 24.39



KENNUNG 24.49

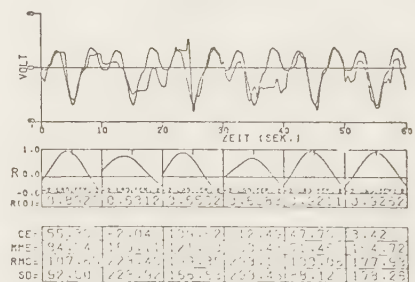


Abbildung 3.30 (Fortsetzung)

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vp 24, Sitzungen 3 (linke Spalte) und 4 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

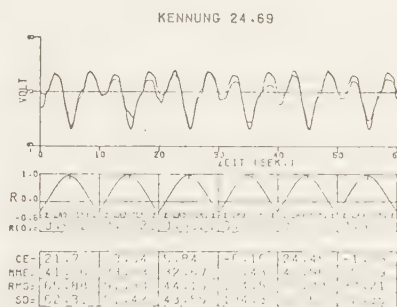
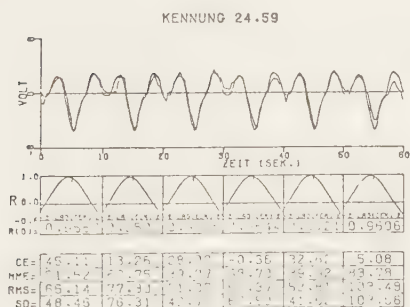
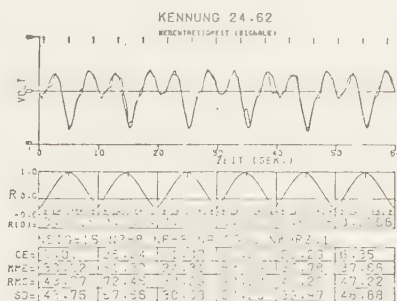
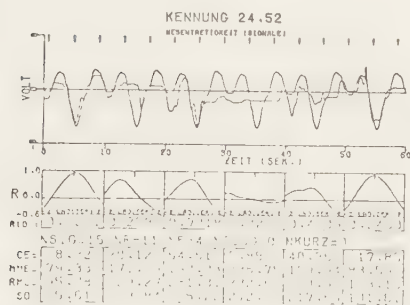
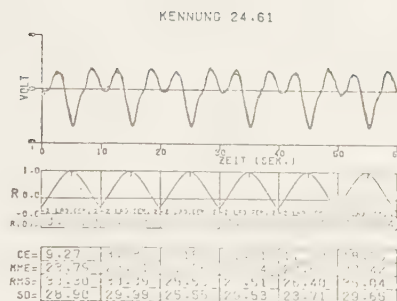
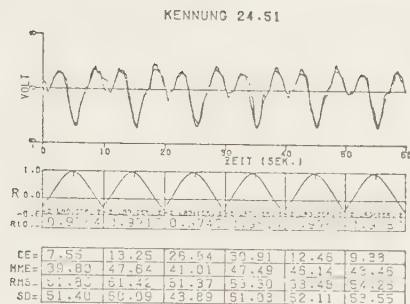


Abbildung 3.30 (Fortsetzung)

Zusammengefaßte Darstellung der Kurven von Führungsgröße und Istwert sowie der Kreuzkorrelationsfunktionen und Fehlerwerte einzelner Perioden für Vj. 24, Sitzungen 2 (linke Spalte) und 3 (rechte Spalte). Versuchsbedingungen: Tracking ohne Nebentätigkeit (obere Zeile), Tracking mit Nebentätigkeit (mittlere Zeile) und Tracking ohne Rückmeldung (untere Zeile).

Durchgang mit Perioden ohne Rückmeldung des Istwertes. Pro Versuchsgruppe wurde eine Vp mit guten und eine mit schlechten Trackingleistungen herausgegriffen.

Es zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Vpn. Die "guten" Vpn zeigen bereits in der ersten registrierten Sitzung gute Übereinstimmungen zwischen Führungsgröße und Istwert, die nicht mehr wesentlich verbessert werden. Bei den "schlechten" Vpn treten dagegen Verbesserungen ihrer Leistungen auf; sie passen ihre Bewegungsstruktur zunehmend besser dem Verlauf der Führungsgröße an.

Auch bei fehlender Rückmeldung des Istwertes haben alle Vpn in der letzten Sitzung den Bewegungsverlauf internalisiert, eine Fortsetzung der Bewegung bei guter Übereinstimmung mit der Führungsgröße ist möglich. Vor allem der zeitliche Verlauf wird gut reproduziert, die Bewegungsamplitude ist bei einigen Vpn verringert.

Eine der Vpn der Experimentalgruppe 2 zeigt in den ersten vier registrierten Sitzungen stark schwankende Bewegungen mit zeitweiligem Bewegungsstillstand. Die in den vorangegangenen Abschnitten aufgefallenen Abweichungen von den anderen Vpn dieser Gruppe können damit zwar näher beschrieben werden, über die Ursachen dieses Verhaltens kann man jedoch nur spekulieren, da die Leistungen in den letzten beiden Sitzungen sprunghaft besser werden und denen der anderen Vpn gleichen.

3.4 Diskussion

3.4.1 Überblick

Sensomotorisches Verhalten in Trackinganordnungen ist häufig untersucht worden, dennoch weiß man nur wenig über die Prozesse, die beim Erlernen einer solchen Aufgabe ablaufen. Die unabhängigen Variablen der Trackingaufgaben wurden vielfältig variiert, und man weiß, wie sich diese Variationen auf die Leistung der Vpn auswirken. In vielen Untersuchungen wurde

festgestellt, daß die Leistungen ungeübter Vpn stark schwankten und große interindividuelle Unterschiede auftraten. Häufig wurde daraus die Konsequenz gezogen, erst nach einer längeren Übungszeit mit der Datenregistrierung zu beginnen, weil sich dann die Leistungen stabilisiert hatten. So sammelte sich eine nur schwer zu überschauende Menge von Einzelbefunden, die kaum systematisch zusammengefaßt werden können (vgl. POULTON, 1974). Das facettenreiche Bild der Beziehungen von unabhängigen und abhängigen Variablen wird dadurch, daß verschiedene abhängige Variablen zur Operationalisierung der Trackingleistung nebeneinander verwendet wurden, noch komplizierter.

Ansätze zu einer theoretischen Aufarbeitung der Befunde sind erst in letzter Zeit entstanden. Alle wesentlichen Variablenkombinationen wurden bereits untersucht. Es drängt sich der Eindruck auf, daß manche Autoren mit der Entwicklung einer Theorie begannen, um weiterzukommen. Das ist zwar überspitzt formuliert, aber ADAMS (1971) begründet seinen theoretischen Ansatz ähnlich. Er geht sogar so weit, den Forschungsgegenstand auf einfache, abgestufte Bewegungen zu reduzieren und von da erneut mit der Forschung zu beginnen. Er kann auf dieser elementaren Ebene einige Hypothesen formulieren und Operationalisierungen anbieten, eine Weiterentwicklung der Theorie steht jedoch aus, da nach der ersten Begeisterung die Zahl der Veröffentlichungen zur Theorie von ADAMS deutlich zurückgegangen ist.

Die theoretischen Ansätze von PEW (1974) und SCHMIDT (1975) sind jüngeren Datums und daher in ihren Auswirkungen auf die Forschungsaktivität noch nicht endgültig einzuschätzen. Die im Vergleich zu ADAMS allgemeinere Annahme eines Schemas (das von SCHMIDT noch aufgegliedert wird) scheint jedoch hinsichtlich einer Generalisierung auf kontinuierliche Bewegungsverläufe erfolgversprechender zu sein. Die konkreten und experimentell überprüfbaren Aussagen der Schema-Theorie sind wie bei Adams auf einfache Bewegungen beschränkt und schließen komplexere Handlungen ausdrücklich aus.

Diese Beschränkung scheint zwar in der Tradition experimenteller Forschung zu liegen, wonach man von einfachen zu komplexen Versuchsbedingungen übergeht und möglichst nur eine unabhängige Variable variiert; das muß aber nicht gleichbedeutend mit einer Einschränkung auf einfache Bewegungen sein. Auch bei einer komplexen Aufgabe, wie sie in den vorliegenden Untersuchungen verwendet wurde, lassen sich einzelne unabhängige Variablen isoliert variieren. Der wesentliche Unterschied liegt nur darin, daß sich wegen der vielen unabhängigen Variablen und ihrer Interdependenzen ein komplexes Bedingungsgefüge ergibt.

Aus den genannten Theorien lassen sich keine spezifischen Hypothesen über das Erlernen einer komplexen Folgetrackingaufgabe ableiten. Die vorliegende Arbeit hat daher vorwiegend Erkundungscharakter; sie versucht in erster Linie Aussagen über Lernprozesse zu machen und erst in zweiter Linie zur Theorienbildung beizutragen.

Die einzelnen Komponenten der Trackingaufgabe wurden aus der Literatur übernommen. Die konkrete Kombination dieser Komponenten war jedoch neu und bestimmte den Charakter der Lernaufgabe. Gefordert war eine kontinuierliche Bewegung über Abschnitte von jeweils 80 Sekunden. Nach den Erfahrungen bei der ersten Untersuchung war die Schwierigkeit so gewählt, daß man einen Lernprozeß erwarten konnte, der sich über mindestens zehn Stunden erstreckte. Die verwendete Führungsgröße war zwar ähnlich unregelmäßig wie die dort verwendeten überlagerten Sinusschwingungen, jedoch offenbar von zu geringer Frequenz, d.h. sie enthielt zu wenige Änderungen von Richtung, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Lernprozesse waren daher bei den meisten Vpn sehr kurz. Von daher stützen sich die Aussagen auf relativ geringe Änderungen der Leistungen über die Sitzungen, die in den meisten Fällen nicht signifikant waren. Im folgenden werden die Ergebnisse in bezug auf die in Abschnitt 1.4 formulierten Fragestellungen zusammengefaßt.

3.4.2 Stellungnahme zu den Fragestellungen

- (a) Erste Fragestellung: Welche Veränderungen lassen sich beim Erlernen einer sensomotorischen Tätigkeit beschreiben?

Bei Trackingaufgaben muß die Abweichung zwischen der extern vorgegebenen Führungsgröße und dem von der Vp erzeugten Istwert möglichst gering gehalten werden. Bei einer kontinuierlichen Führungsgröße muß eine Vp also auch eine kontinuierliche Bewegung produzieren, die hinsichtlich Amplitude und Frequenz der Führungsgröße angepaßt ist.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Kurven von Führungsgröße und Istwert bereits zu Beginn des Lernprozesses gut übereinstimmen, es sind nur geringe Verbesserungen möglich. Die Bewegungen der Vpn weisen jedoch zu Beginn noch größere Schwankungen auf, es werden häufige und starke Korrekturen vorgenommen. Später nehmen diese Schwankungen ab, die Anpassung von Amplitude und Frequenz wird zunehmend besser, so daß keine größeren Abweichungen mehr auftreten und dementsprechend auch nur wenige und geringe Korrekturen nötig sind.

Diese Entwicklung wird vom Effekt der Nebentätigkeit überlagert. Die Belastung führt zu einem erneuten Anstieg der Bewegungsvariation, die konstanten Fehler bleiben aber weiter gering.

Die meisten Vpn sind bereits zu Beginn des Lernprozesses in der Lage, dem zeitlichen Verlauf der Führungsgröße entsprechende Bewegungen auszuführen, auch ohne den Effekt ihrer Bewegungen zu sehen. Nur die Amplitude ist bei manchen Vpn eingeschränkt.

- (b) Zweite Fragestellung: In welchem Maße sind Fehlerwerte und Korrelationsfunktionen geeignet, Aussagen über Lernprozesse zu machen?

Fehler sind in diesem Fall Abweichungen von Führungsgröße

und Istwert. Die Abweichungen können sich innerhalb kürzester Zeit stark verändern, daher sind aufsummierte Fehlerwerte nur ungenaue Anhaltspunkte für das zugrundeliegende Verhalten. Die in vielen Untersuchungen vorgenommene Beschränkung auf ein Fehlermaß liefert Ergebnisse, die umso weniger aussagekräftig sind, je länger die zugrundeliegende Trackingdauer ist. Besonders kritisch ist eine Beschränkung auf den absoluten Fehler. Dieser "devil in disguise" (SCHUTZ & ROY, 1973) läßt sich, zumindest bei normalverteilten Fehlerwerten, aus konstanten und variablen Fehlern ableiten.

Konstanter und variabler Fehler erwiesen sich in der zweiten Untersuchung als gut geeignet zur Beschreibung der Trackingleistungen. Die Aufgabe war so leicht, daß der Führungsgröße ohne wesentliche konstante Fehler gefolgt werden konnte. Die Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit durch Einführen der Nebentätigkeit führte zu einem Anstieg der variablen Fehler. Außerdem wurden die variablen Fehler mit fortschreitender Übung homogener. Selbst die Vpn mit schlechten Trackingleistungen zeigten in den letzten Sitzungen eine Konsolidierung des variablen Fehlers.

Die aus den Kreuzkorrelationsfunktionen abgeleiteten Variablen lieferten keinen wesentlichen Informationsgewinn gegenüber den Fehlerwerten. Der zeitliche Verlauf der Führungsgröße war so gut zu erkennen, daß keine nennenswerten Vor- oder Rückhalte der Bewegungen auftraten; die Korrelationsfunktionen hatten in der Regel ihr erstes Maximum bei einer Zeitverschiebung von Null und fielen mit positiver oder negativer Zeitverschiebung symmetrisch ab.

- (c) Dritte Fragestellung: Ändert sich der Verlauf des Lernprozesses, wenn die Informationsverarbeitungskapazität des Lernenden zu verschiedenen Zeitpunkten des Lernprozesses beeinträchtigt wird?

Die Einführung der belastenden Nebentätigkeit führte zu einer Leistungsbeeinträchtigung, die sich vor allem in einem Anstieg der variablen Fehler äußerte. Dieser Effekt fiel jedoch

für einzelne Vpn unterschiedlich stark aus; manche Vpn zeigten eine starke Beeinträchtigung, andere nur eine geringe. Dementsprechend war der Effekt am deutlichsten bei den Kurven der Gruppenmittelwerte zu erkennen.

Dabei zeigte sich, daß eine frühe Belastung (Experimentalgruppe 1) die "Internalisierung" des Bewegungsverlaufes störte und dazu führte, daß die Vpn vorwiegend auf Abweichungen von Soll- und Istwert reagierten. Bei einer späteren Belastung (Experimentalgruppe 2) wurden die Leistungen zwar schlechter, die Vpn beschränkten sich aber nicht nur auf Fehlerkorrekturen, sondern entwickelten "motorische Programme".

Die Konzepte "Internalisierung" und "motorisches Programm" müssen an dieser Stelle noch einmal erläutert und abgegrenzt werden, um die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit verständlicher zu machen.

"Internalisiert" werden Ausmaß und Richtung einer Bewegung, d.h. eine Bewegung bestimmter Richtung und Entfernung kann über interne Rückmeldungen ebenso gut kontrolliert werden wie über externe Rückmeldungen.

Der Begriff "motorisches Programm" ist vielschichtig und nicht eindeutig festgelegt. Man spricht auch von "automatisierten Bewegungen", "Erfahrungsantizipation" oder "Bewegungsentwurf". Gemeint ist, daß eine Vorstellung der auszuführenden Bewegung im Langzeitgedächtnis gespeichert ist, und die Ausführung dieser vorgestellten Bewegung je nach Aufgabenbedingung modifiziert wird.

Bei einfachen Zielbewegungen, auf die sich diese Ansätze vor allem beziehen, betrifft die Modifikation Ausmaß und Richtung der Bewegung. Bei der verwendeten Folgetrackingaufgabe ändert sich jedoch das "Ziel" kontinuierlich. Daher müssen nicht nur Ausmaß und Richtung der Bewegung modifiziert, sondern auch der Verlauf der Führungsgröße antizipiert werden. Motorische Programme müssen bei einer solchen Aufgabe diese beiden

Komponenten beinhalten.

Das Erlernen der Führungsgröße war für alle Vpn in gleicher Weise möglich, d.h. die experimentellen Bedingungen unterschieden sich diesbezüglich nicht.

Wenn wir also feststellen, daß die Vpn der Experimentalgruppe 2 motorische Programme entwickelten, so verstehen wir darunter, daß Informationen über den Verlauf der Führungsgröße und über Zuordnungen von Armbewegungen und Istwert gespeichert wurden und exterozeptive Rückmeldungen über Abweichungen von Soll- und Istwert, die zu Beginn wesentliche Voraussetzungen der Trackingtätigkeit darstellten, zunehmend weniger erforderlich waren. Die sensomotorische Leistung verlagerte sich von der Korrektur der Abweichungen auf weitgehend intern gesteuerte Bewegungsvollzüge, die nur gelegentlich, d.h. wenn Abweichungen von Soll- und Istwert entstanden, korrigiert wurden. Je länger der Lernprozeß dauerte oder, mit anderen Worten, je besser das motorische Programm gefestigt war, desto weniger Abweichungen traten auf, und die Vpn waren entsprechend weniger auf exterozeptive Rückmeldung angewiesen.

Die Leistungseinbußen unter Belastung im zweiten Versuchsdrittel belegen, daß zu diesem Zeitpunkt die motorischen Programme noch nicht so gefestigt oder die sensomotorischen Koordinationen noch nicht so automatisiert waren, daß genügend freie Kapazität zur Verfügung stand. Wie die Daten der Perioden ohne Rückmeldung zeigen, fielen die Vpn jedoch offensichtlich nicht auf ein nur fehlerkorrigierendes Verhalten zurück.

Demgegenüber kamen zumindest einige Vpn der Experimentalgruppe 1 nicht über eine Fehlerkorrektur hinaus. Da zu einer Korrektur der Abweichungen von Soll- und Istwert die Rückmeldung über beide Größen erforderlich war, brach die Leistung bei ausgeblendetem Istwert weitgehend zusammen. Die motorischen Programme dieser Vpn blieben wesentlich unvollkommener als bei den anderen Gruppen.

- (d) Vierte Fragestellung: Führen Störungen des Lernprozesses durch solche Belastungen zu unterschiedlichen "Endzuständen" beim Lernen?

Die beeinträchtigende Wirkung der Nebentätigkeit fiel zwar recht gering aus, die Leistungen der Experimentalgruppen waren jedoch in den letzten beiden Sitzungen, wo alle drei Versuchsgruppen ohne Belastung übten, wesentlich besser als die der Kontrollgruppe. Von den beiden Experimentalgruppen war die erste wiederum besser als die zweite, ein früheres Einsetzen der Belastung war demnach förderlicher als ein späteres.

Sieht man von den unter (c) beschriebenen Unterschieden ab, so ist festzustellen, daß gegen Ende der zehn Sitzungen die Leistungsschwankungen über einzelne Perioden abnahmen. Selbst bei fehlender Rückmeldung waren die Übereinstimmungen von Führungsgröße und Istwert im allgemeinen recht gut, zumindest in zeitlicher Hinsicht. Die Bewegungsamplitude war in einigen Fällen deutlich eingeschränkt. Dies kann damit zusammenhängen, daß der geforderte Bewegungsbereich des Armes im Vergleich zu sonstigen praktischen Tätigkeiten recht groß war, und zwar war für eine Bewegung des Istwertes um wenige Zentimeter eine Bewegung des Armes erforderlich, die eine etwa drei- bis vierfache Positionsverlagerung der Hand ausmachte.

3.4.3 Praktische Folgerungen

Ein wesentlicher Unterschied zwischen experimentellen Untersuchungen und praktischen Arbeitssituationen besteht darin, daß im Labor die Zahl der unabhängigen Variablen reduziert wird, um möglichst wenige Bedingungsfaktoren kontrollieren zu müssen. Bei experimentell evozierten Lernprozessen werden in der Regel gerade jene Faktoren ausgeklammert bzw. konstant gehalten, die in praktischen Lernsituationen eine Rolle spielen können, nämlich belastende Stressoren.

Solche Stressoren wurden in der vorliegenden Arbeit durch eine Nebentätigkeit simuliert. Es zeigte sich, daß bei der gewähl-

ten Anordnung zwar geringe Leistungsbeeinträchtigungen durch die Belastung auftraten, der Lernprozeß jedoch gefördert wurde, also nach dem Wegfall der Belastung bessere Leistungen möglich waren, als wenn ohne Belastung gelernt worden war. In der Praxis bleiben belastende Faktoren zwar weiter bestehen, man kann jedoch folgern, daß es nicht unbedingt erforderlich sein muß, beim Anlernen von Arbeitskräften für sensomotorische Tätigkeiten eine belastungsfreie Situation herzustellen.

Allerdings gibt es offenbar Personen, die anfälliger gegenüber Belastungen während des Lernprozesses sind und das hohe Leistungsniveau der anderen erst nach Wegfall der Belastung erreichen. Es können keine Aussagen darüber gemacht werden, ob diese Personen auch bei weiterer Belastung ein hohes Leistungsniveau erreichen. Es ist zu prüfen, ob solche Personen für sensomotorische Tätigkeiten, die unter belastenden Umgebungsbedingungen gelernt und ausgeführt werden, geeignet sind.

Außerdem scheinen frühzeitige Belastungen des Lernprozesses eine Automatisierung der sensomotorischen Koordination zu stören. Es deutet sich an, daß Handlungsstrategien gefestigt werden, die ein relativ hohes Maß an zentraler Kapazität erfordern.

Eine weitere Schlußfolgerung aus den Ergebnissen dieser Arbeit betrifft die Dauer von Anlernprozessen. Vor allem die Daten der ersten Untersuchung zeigen, daß komplexere sensomotorische Tätigkeiten relativ lange geübt werden müssen, bis eine Stabilisierung der Leistungen eintritt. Je nach Schwierigkeit der Aufgabe schwankt diese Zeitspanne zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden. Die Spanne der Pausen zwischen einzelnen Übungsperioden scheint zwar bis zu einem Tag keine merklichen Auswirkungen zu haben (KALVERAM, MERZ & RIEGELS, 1973), jedoch dürfen die einzelnen Übungsabschnitte nicht zu kurz sein, weil vor allem zu Beginn des Lernprozesses große Leistungsschwankungen auftreten.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Es gibt vielfältige und komplexe sensomotorische Koordinationsleistungen, die weitgehend ohne wesentliche "Beachtung" ablaufen. Jemand, der beim Frühstück die Morgenzeitung liest und dabei nach seiner Kaffeetasse greift, diese zum Mund führt, trinkt und sie wieder sicher zurückstellt, ohne dabei mit dem Lesen aufzuhören, ist sich in der Regel kaum bewußt, daß dieses Verhalten das Ergebnis eines Lernprozesses ist. Ihm wird die Automatisierung dieser Koordinationsleistung erst bewußt, wenn der Ablauf extern gestört wird. Er muß dann die Lektüre unterbrechen, um nachzusehen, wo die Tasse steht und dann gezielt danach greifen. Beim nächsten Mal kann er die neue Position der Tasse antizipieren und wieder danach greifen, ohne seine Lektüre zu unterbrechen.

Dieses einfache, alltägliche Beispiel verdeutlicht, daß visuell-motorische Koordinationen automatisiert werden können; man bezeichnet den Endzustand dieses Lernprozesses als Fertigkeit. Die vorliegende Arbeit versucht, die beim Erwerb einer neuen Fertigkeit auftretenden Veränderungen näher zu erkennen und zu beschreiben.

Als experimentelles Paradigma eines solchen Lernprozesses bietet sich eine Folgetrackinganordnung an. Dabei müssen zwei Marken in Deckung gehalten werden. Eine Marke (Führungsgröße) ändert sich entsprechend einem extern vorgegebenen zeitlichen Verlauf; die Vp muß durch motorische Aktionen die zweite Marke (Istwert) so nachführen, daß keine Abweichungen auftreten. Tracking erfordert also eine Wahrnehmung der Abweichung von Führungsgröße und Istwert und die Auswahl und Ausführung einer motorischen Aktion zur Kompensierung dieser Abweichung.

In einer ersten Untersuchung wurden verschiedene Variationen einer Folgetrackinganordnung hinsichtlich ihrer Lernschwierigkeit untersucht. Die beiden wesentlichen unabhängigen Variablen sind Art und Regelmäßigkeit der Führungsgröße und die Transformation der motorischen Aktion der Vp (Bediensignal) in den Istwert. Es zeigte sich, daß bei einer unregelmäßigen,

aus mehreren überlagerten Sinusschwingungen bestehenden Führungsgröße und proportionaler Transformation des Bediensignals die Leistungen über zehn Sitzungen von jeweils einer Stunde Dauer kontinuierlich besser wurden und auch nach dieser langen Übungszeit noch Leistungsverbesserungen möglich waren.

In einer zweiten Untersuchung wurde versucht, den Lernprozeß näher zu analysieren. Da in der Praxis sensomotorische Koordinationsleistungen selten unter weitgehend störungsfreien Bedingungen gelernt werden, wurde überprüft, ob das Erlernen der Trackingaufgabe durch Belastungen gestört wird. Als Belastung im Sinne einer erhöhten Anforderung an die Informationsverarbeitungskapazität der Vpn wurde eine Nebentätigkeit (Wahlreaktionsaufgabe) eingeführt, die gleichzeitig mit der Trackingaufgabe ausgeführt werden mußte. Da vermutet werden kann, daß eine derartige Belastung zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Auswirkungen auf den Lernprozeß haben kann, wurden drei Versuchsgruppen gebildet. Die Kontrollgruppe übte immer ohne Belastung, eine Experimentalgruppe übte im ersten Drittel der neunstündigen Übungsdauer und die zweite Experimentalgruppe in zweiten Drittel unter Belastung. Während der letzten drei Stunden übten alle drei Gruppen ohne Belastung; Leistungsunterschiede zwischen den Gruppen können als Effekte vorhergehender Belastung interpretiert werden.

Der Grad der Internalisierung der sensomotorischen Leistung wurde durch kurzfristiges Ausblenden der Rückmeldung über den Bewegungseffekt überprüft.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

1. Die Führungsgröße erwies sich als relativ "leicht", d.h. die Vpn zeigten in der Regel bereits in der ersten Versuchssitzung sehr gute Trackingleistungen, die während der folgenden Sitzungen nur noch wenig gesteigert werden konnten.
2. Die Leistungen der Vpn in den drei Versuchsgruppen waren relativ homogen, jedoch gab es in jeder Gruppe eine oder zwei (von fünf) Vpn, deren Werte sich deutlich von denen der anderen Vpn abhoben. Die Unterschiede lagen vor allem in einer höheren Variabilität der Leistung.

3. Ein wesentliches Merkmal des Lernprozesses war eine zunehmende Stabilisierung der Leistung. Die Schwankungen zwischen einzelnen Versuchsabschnitten nahmen mit zunehmender Übung ab. Im letzten Versuchsdrittel war auch die Leistung der schlechten Vpn (vgl. Punkt 2) ähnlich gut und homogen wie die der anderen Vpn.
4. Die Belastung durch Nebentätigkeit wirkte sich zu verschiedenen Zeitpunkten des Lernprozesses unterschiedlich aus. Die Trackingleistungen wurden bei gleichzeitiger Nebentätigkeit nur geringfügig schlechter; nach Wegfall der Belastung stiegen sie jedoch stärker an als bei der Kontrollgruppe, die ohne Nebentätigkeit übte. Dabei war der Leistungsanstieg umso größer, je früher die Belastung einsetzte und wieder aufhörte. Dementsprechend waren die Leistungen der Experimentalgruppen im letzten Versuchsdrittel deutlich besser als die der Kontrollgruppe, und die der Experimentalgruppe 1 besser als die der Experimentalgruppe 2.
5. Diese Unterschiede zwischen den Gruppen sind allerdings nur bei dem unter Punkt 2 angesprochenen "schlechten" Vpn deutlich aufgetreten. Diese Vpn reagierten am stärksten auf die Belastung, d.h. ihre Leistungen sanken wesentlich stärker als die der anderen Vpn und stiegen nach Wegfall der Belastung stärker an. Die anderen Vpn wiesen gleichmäßige Leistungsverbesserungen auf; die Unterschiede zwischen den Gruppen waren gering. Die Werte der "schlechten" Vpn führten bei den Gruppenmittelwerten zu den beschriebenen Unterschieden zwischen den Gruppen.
6. Daraus folgt, daß Lernen unter belastenden Bedingungen für manche Vpn eine längere Übungszeit erforderlich machte, bis sie ein hohes Leistungsniveau erreichten. Da bei diesen Vpn die Leistungssteigerung erst einsetzte, nachdem die Belastung weggefallen war, könnte es in der Praxis angebracht sein, solche Personen zu selektieren. Ob und inwieweit solche Personen bei fortdauernder Belastung lernen und ihre Leistung verbessern, kann aufgrund dieser Untersuchung nicht gesagt werden.

7. Bei fehlender Rückmeldung zeichnet sich das Trackingverhalten aller Vpn in den letzten Sitzungen durch gute Anpassung an die zeitlichen Merkmale der Führungsgröße aus; die Bewegungsamplitude war jedoch bei einigen Vpn eingeschränkt. Da die Perioden ohne Rückmeldung zehn Sekunden dauerten, kann man daraus schließen, daß motorische Programme ausgebildet wurden, wodurch sich Fertigkeiten im Sinne des oben geschilderten Beispiels auszeichnen. Die Vpn können auch "ohne hinzusehen" eine Bewegung ausführen, die dem zeitlichen Verlauf der Führungsgröße gut entspricht.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- ADAMS, J.A.: Human tracking behavior. Psychological Bulletin 1961, 58, 55-79.
- ADAMS, J.A.: Motor skills. Annual Review of Psychology 1964, 15, 181-202.
- ADAMS, J.A.: A closed-loop theory of motor learning. Journal of Motor Behavior 1971, 3, 111-149.
- ADAMS, J.A. & R.W. CHAMBERS: Response to simultaneous stimulation of two sense modalities. Journal of Experimental Psychology 1962, 63, 198-206.
- ADAMS, J.A. & L.R. CREAMER: Proprioceptive variables as determiners of anticipatory timing behavior. Human Factors 1962, 4, 217-222.
- ADAMS, J.A. & L.V. XHIGNESSE: Some determinants of two-dimensional visual tracking behavior. Journal of Experimental Psychology 1960, 60, 391-403.
- AMMONS, R.B., R.G. FARR, E.BLOCH, E.NEUMANN, M. DEY, R.MARION & C.H. AMMONS: Long-term retention of perceptual-motor skills. Journal of Experimental Psychology 1958, 55, 318-328.
- ANASTASI, A.: Fields of applied psychology. New York usw.: McGraw-Hill, 1964.
- ANGEL, R.W., B.GARLAND & M. FISCHLER: Tracking errors amended without visual feedback. Journal of Experimental Psychology 1971, 89, 422-424.
- BAHRICK, H.P. & M.E. NOBLE: Motor behavior. In: J.B.SIDOWSKI (ed.): Experimental methods and instrumentation in psychology. New York usw.: McGraw-Hill, 1966, 645-675.
- BAHRICK, H.P. & C.SHELLY: Time sharing as an index of automatization. Journal of Experimental Psychology 1958, 56, 288-293.
- BAHRICK, H.P., M.NOBLE & P.M. FITTS: Extra-task performance as a measure of learning a primary task. Journal of Experimental Psychology 1954, 48, 298-302.
- BAHRICK, H.P., P.M. FITTS & G.E. BRIGGS: Learning curves-facts or artifacts? Psychological Bulletin 1957, 54, 256-268.
- BARTENWERFER, H.: Beiträge zum Problem der psychischen Beanspruchung. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 808, 1960.
- BARTLETT, F.C.: Remembering. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.

- BARTLETT, F.C.: Thinking. London: Unwin University Books, 1958.
- BECKMANN, E. & M.SCHIPKE: Koordination motorischer Tätigkeiten in Abhängigkeit verschiedener Geübtheitsgrade und Übungsbedingungen. Unveröffentlichte Semesterarbeit. Marburg/L: Fachbereich Psychologie, 1975.
- BEKEY, G.A.: The human operator as a sampled-data system. IRE Transactions on Human Factors in Electronics 1962, 3, 43-51.
- BEKEY, G.A.: The human operator in control systems. In: K.B. deGREENE (ed.): Systems psychology. New York usw.: McGraw-Hill, 1970, 248-277.
- BERNSTEIN, N.: The co-ordination and regulation of movements. London: Pergamon Press, 1967.
- BILODEAU, E.A. & I.McD. BILODEAU: Motor skills learning. Annual Review of Psychology 1961, 12, 243-280.
- BORNEMANN, E.: Untersuchungen über den Grad der geistigen Beanspruchung. Arbeitsphysiologie 1942, 12, 142-191.
- BRIGGS, G.E.: Comments on Dr. POULTON's paper. In: E.A. BILODEAU (ed.): Acquisition of skill. New York usw.: Academic Press, 1966, 411-424.
- BRIGGS, G.E.: The generality of research on transfer functions: comments on Professor FITTS' paper. In: A.W.MELTON (ed.): Categories of human learning. New York usw.: Academic Press, 1964, 286-292.
- BROWN, I.D.: Measuring the spare mental capacity of car drivers by a subsidiary auditory task. Ergonomics 1962, 5, 247-250.
- BROWN, I.D.: A comparison of two subsidiary tasks used to measure fatigue in car drivers. Ergonomics 1965, 8, 467-473.
- BROWN, I.D. & E.C. POULTON: Measuring the spare 'mental capacity' of car drivers by a subsidiary task. Ergonomics 1961, 4, 35-40.
- BRYAN, W.L. & N. HARTER: Studies on the telegraphic language: The acquisition of a hierarchy of habits. Psychological Review 1899, 6, 345-375.
- CHERNIKOFF, R. & F.V.TAYLOR: Effects of course frequency and aided time constant on pursuit and compensatory tracking. Journal of Experimental Psychology 1957, 53, 285-292.
- CHRISTINA, R.W.: Proprioception as a basis for the temporal anticipation of motor responses. Journal of Motor Behavior 1970, 2, 125-133.
- CHRISTINA, R.W.: Movement-produced feedback as a mechanism for the temporal anticipation of motor responses. Journal of Motor Behavior 1971, 3, 97-104.

- CONNOLLY, K. (ed.): Mechanism of motor skill development. New York usw.: Academic Press, 1970.
- CRAIK, K.J.W.: Theory of the human operator in control systems: I. The operator as an engineering system. British Journal of Psychology 1947, 38, 56-61.
- CRAIK, K.J. W.: Theory of the human operator in control systems: II. Man as an element in a control system. British Journal of Psychology 1948, 38, 142-148.
- CRATTY, B.J.: Movement behavior and motor learning. Philadelphia: Lea & Febiger, 1973³.
- FITTS, P.M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movements. Journal of Experimental Psychology 1954, 47, 381-391.
- FITTS, P.M.: Perceptual-motor skill learning. In: A.W.MELTON (ed.): Categories of human learning. New York usw.: Academic Press, 1964, 243-285.
- FITTS, P.M. & M.I. POSNER: Human performance. London: Prentice-Hall, 1973.
- FUCHS, A.H.: The progression-regression hypothesis in perceptual-motor skill learning. Journal of Experimental Psychology 1962, 63, 177-182.
- GAGNÉ, R.M.: The conditions of learning. New York usw.: Holt, Rinehart & Winston, 1965.
- GARVEY, W.D.: A comparison of the effects of training and secondary tasks on tracking behavior. Journal of Applied Psychology 1960, 44, 370-375.
- GARVEY, W.D. & J.B. HENSON: Interactions between display gain and task-induced stress in manual tracking. Journal of Applied Psychology 1959, 43, 205-208.
- GARVEY, W.D. & F.V.TAYLOR: Interactions among operator variables, system dynamics, and task-induced stress. Journal of Applied Psychology, 1959, 43, 79-85.
- GOTTSDANKER, R.M.: The accuracy of prediction motion. Journal of Experimental Psychology 1952a, 43, 26-36.
- GOTTSDANKER, R.M.: Prediction-motion with and without vision. American Journal of Psychology 1952b, 65, 533-543.
- GOTTSDANKER, R.M.: A further study of prediction-motion. American Journal of Psychology 1955, 68, 432-437.
- GOTTSDANKER, R.M.: Prediction-span, speed of response, smoothness, and accuracy in tracking. Perceptual and Motor Skills 1956, 6, 171-181.

- GRIEW, S.: Set to respond and the effect of interrupting signals upon tracking performance. Journal of Experimental Psychology 1959, 57, 333-337.
- HENRY, F.M.: Variable and constant performance errors within a group of individuals. Journal of Motor Behavior 1974, 6, 149-154.
- HENRY, F.M.: Absolute error vs. "E" in target accuracy. Journal of Motor Behavior 1975, 7, 227-228.
- HENRY, F.M. & D.E. ROGERS: Increased response latency for complicated movements and a "Memory Drum" theory of neuro-motor reaction. Research Quarterly 1960, 31, 448-458. Abgedruckt in: R.N.SINGER (ed.): Readings in motor learning. Philadelphia: Lea & Febiger, 1972, 439-446.
- HERLITZ, E. & R.WITT: Einfluß von Reaktionsaufgaben auf die Trackingleistung. Unveröffentlichte Semesterarbeit. Marburg/L: Fachbereich Psychologie, 1975.
- HETTINGER, T., G. KAMINSKY & H. SCHMALE: Ergonomie am Arbeitsplatz. Ludwigshafen: Kiehl, 1976.
- v. HOLST, E. & H.MITTELSTAEDT: Das Reafferenzprinzip. Die Naturwissenschaften 1950, 37, 464-476.
- HOYOS, C. Graf: Arbeitspsychologie. Stuttgart usw.: Kohlhammer, 1974.
- HUDDLESTON, H.F. & R.V.WILSON: An evaluation of the usefulness of four secondary tasks in assessing the effect of a lag in simulated aircraft dynamics. Ergonomics 1971, 14, 371-380.
- IRION, A.L.: Historical introduction. In: E.A.BILODEAU (ed.): Principles of skill acquisition. New York usw.: Academic Press, 1969, 1-31.
- JAHNS, D.W.: A concept of operator workload in manual vehicle operations. Meckenheim: Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Forschungsbericht Nr. 14, Dezember 1973.
- JOHANNSEN, G.: Nebenaufgaben als Beanspruchungsmeßverfahren in Fahrzeugführungsaufgaben. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 1976, 30, 45-50.
- JOHNSON, H.W.: Skill = speed x accuracy x form x adaptability. Perceptual and Motor Skills 1961, 13, 163-170.
- JOHNSTON, W.A., S.N. GREENBERG, R.P. FISHER & D.W.MARTIN: Divided Attention: a vehicle for monitoring memory processes. Journal of Experimental Psychology 1970, 83, 164-171.
- JONES, B.: Is proprioception important for skilled performance? Journal of Motor Behavior 1974, 6, 33-45.

- KALSBECK, J.W.H.: On the measurement of deterioration in performance caused by distraction stress. *Ergonomics* 1964, 7, 187-195.
- KALVERAM, K.T., F.MERZ & V.RIEGELS: Einfluß von Pausen auf die Leistung bei Steuertätigkeiten. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung. Forschungsbericht Nr. 112, 1973.
- KAY, H.: The development of motor skills from birth to adolescence. In: E.A.BILODEAU (ed.): Principles of skill development. New York usw.: Academic Press, 1969, 33-57.
- KEELE, S.W.: Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin* 1968, 70, 387-403.
- KELLER, F.S.: The phantom plateau. *Journal of Experimental Analysis of Behaviour* 1958, 1, 1-13.
- KELLEY, C.R.: Manual and automatic control. New York usw.: Wiley, 1968.
- KENNEDY, J.L.: Psychology and system development. In: R.N. GAGNE (ed.): Psychological principles in system development. New York usw.: Holt, Rinehart & Winston, 1963, 13-32.
- LANC, O.: *Ergonomie*. Stuttgart usw.: Kohlhammer, 1975.
- LASZLO, J.I. & L.C. MANNING: The role of motor programming, command, and standard in the central control of skilled movement. *Journal of Motor Behavior* 1970, 2, 111-124.
- LICKLIDER, J.C.R.: Quasi-linear operator models in the study of manual tracking. In: R.D.LUCE (ed.): Developments in mathematical psychology. Glencoe, Ill.: The Free Press, 1960, 167-279.
- LIENERT, G.A.: Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik, Band 1. Meisenheim: Hain, 1973.
- LIEPMANN, H.: Über Störungen des Handelns bei Gehirnkranke. Berlin: Karger, 1905.
- LOVELESS, N.E.: Direction-of-motion stereotypes: a review. *Ergonomics* 1962, 5, 357-383.
- MAIER, N.R.F.: Psychology in industrial organizations. Boston usw.: Houghton Mifflin, 1973⁴.
- MARTIN, D.W.: Residual processing capacity during verbal organization in memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 1970, 9, 391-397.
- MCCORMICK, E.J.: Human factors engineering. New York usw.: McGraw-Hill, 1970³.
- McGEOCH, J.A.: The acquisition of skill. *Psychological Bulletin* 1927, 24, 437-466.

- McGEOCH, J.A.: The acquisition of skill. Psychological Bulletin 1929, 26, 457-498.
- McLEOD, P.D.: Recovery strategy during temporary obscuration of a tracked target. Ergonomics 1972, 15, 57-64.
- McLEOD, P.D.: Interference of "attend to and learn" tasks with tracking. Journal of experimental Psychology 1973, 99, 330-333.
- McROUR, D.T. & E.S. KRENDEL: The human operator as a servo system element. Journal of the Franklin Institute 1959, 267, 1-49.
- MEISTER, D.: Human factors: Theory and practice. New York usw.: Wiley, 1971.
- MEISTER, D.: Behavioral foundations of system development. New York usw.: Wiley, 1976.
- MERRILL, W.J. & C.A. BENNETT: The application of temporal correlation techniques in psychology. Journal of Applied Psychology 1956, 40, 272-280.
- MICHON, J.A.: A note on the measurement of perceptual motor load. Ergonomics 1964, 7, 461-463.
- MICHON, J.A.: Tapping regularity as a measure of perceptual motor load. Ergonomics 1966, 9, 401-412.
- MICHON, J.A. & H. vanDOORNE: A semi-portable apparatus for the measurement of perceptual motor load. Ergonomics 1967, 10, 67-72.
- MILLER, G.A., E.GALANTER & K.H.PRIBRAM: Plans and the structure of behavior. New York usw.: Holt, Rinehart & Winston, 1960.
- MITTENECKER, E.: Methoden und Ergebnisse der psychologischen Unfallforschung. Wien: Deuticke, 1962.
- NEWELL, K.M.: More on absolute error, etc. Journal of Motor Behavior 1976, 8, 139-142.
- NOBLE, C.E.: The learning of psychomotor skills. Annual Review of Psychology 1968, 19, 203-250.
- NOBLE, M. & D.TRUMBO: The organization of skilled response. Organizational Behavior and Human Performance 1967, 2, 1-25.
- NOBLE, M., P.M. FITTS & C.E.WARREN: The frequency response of skilled subjects in a pursuit tracking task. Journal of Experimental Psychology 1955, 49, 249-256.
- NOBLE, M., D.TRUMBO & F.FOWLER: Further evidence on secondary task interference in tracking. Journal of Experimental Psychology 1967, 73, 146-149.

- PEW, R.W.: Acquisition of hierarchical control over the temporal organization of a skill. Journal of Experimental Psychology 1966, 71, 764-771.
- PEW, R.W.: Toward a process-oriented theory of human performance. Journal of Motor Behavior 1970, 2, 8-24
- PEW, R.W.: Human perceptual-motor performance. In: B.H. KANTOWITZ (ed.): Human information processing: Tutorials in performance and cognition. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum, 1974, 1-39.
- PEW, R.W. & G.L. RUPP: Two quantitative measures of skill development. Journal of Experimental Psychology 1971, 90, 1-7.
- PEW, R.W., J.C. DUFFENDACK & L.K. FENSCH: Sine-wave tracking revisited. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics 1967, HFE-8, 130-134.
- POSNER, M.I.: Reduced attention and the performance of "automated" movements. Journal of Motor Behavior 1969, 1, 245-258.
- POULTON, E.C.: Perceptual anticipation in tracking with two-pointer and one-pointer displays. British Journal of Psychology 1952a, 43, 222-229.
- POULTON, E.C.: The basis of perceptual anticipation in tracking. British Journal of Psychology 1952b, 43, 295-302.
- POULTON, E.C.: On the stimulus and response in pursuit tracking. Journal of Experimental Psychology 1957a, 53, 189-194.
- POULTON, E.C.: Learning the statistical properties of the input in pursuit tracking. Journal of Experimental Psychology 1957b, 54, 28-32.
- POULTON, E.C.: On prediction in skilled movements. Psychological Bulletin 1957c, 54, 467-478.
- POULTON, E.C.: On simple methods of scoring tracking error. Psychological Bulletin 1962, 59, 320-328.
- POULTON, E.C. Tracking behavior. In: E.A.BILODEAU (ed.): Acquisition of skill. New York usw.: Academic Press, 1966, 361-410.
- POULTON, E.C.: Tracking: In: E.A.BILODEAU (ed.): Principles of skill acquisition. New York usw.: Academic Press, 1969, 287-318.
- POULTON, E.C.: Tracking skill and manual control. New York usw.: Academic Press, 1974.

- QUESEDA, D.C. & R.A. SCHMIDT: A test of the ADAMS-CREAMER decay hypothesis for the timing of motor responses. Journal of Motor Behavior 1970, 2, 273-283.
- RÜSSEL, A.: Psychomotorik. Darmstadt: Steinkopff, 1976.
- SCHAEFFER, B.: Skill integration during cognitive development. In: A.KENNEDY & A.WILKES (eds.): Studies in long term memory. New York usw.: Wiley, 1975, 165-180.
- SCHMIDT, R.A.: Anticipation and timing in human motor performance. Psychological Bulletin 1968, 70, 631-646.
- SCHMIDT, R.A.: Proprioception and the timing of motor responses. Psychological Bulletin 1971, 76, 383-393.
- SCHMIDT, R.A.: A schema theory of discrete motor skill learning. Psychological Review 1975, 82, 225-260.
- SCHMIDT, R.A. & R.W.CHRISTINA: Proprioception as a mediator in the timing of motor responses. Journal of Experimental Psychology 1969, 81, 303-307.
- SCHOUTEN, J.F., J.W.H. KALSBECK & F.F.LEOPOLD: On the evaluation of perceptual and mental load. Ergonomics 1962, 5, 251-260.
- SCHUTZ, R.W.: Absolute error. Journal of Motor Behavior 1974, 6, 299-301.
- SCHUTZ, R.W. & E.A. ROY: Absolute error: The devil in disguise. Journal of Motor Behavior 1973, 5, 141-153.
- SHANNON, C.E. & W.WEAVER: The mathematical theory of communication. Urbana, Ill.: University of Illinois Press, 1949.
- SINGER, R.N.: Motor learning and human performance. New York usw.: Macmillan, 1975².
- SLACK, C.W.: Learning in simple one-dimensional tracking. American Journal of Psychology 1953, 66, 33-44.
- SMITH, K.U.: Delayed sensory feedback and behavior. Philadelphia: Saunders, 1962.
- SMITH, S.: Effects of control-display relationship on tracking in a dual-task setting. Perceptual and Motor Skills 1963, 17, 954.
- SMITH, K.U.: Cybernetic Psychology. In: R.N.SINGER (ed.): The psychomotor domain: Movement behavior. Philadelphia: Lea & Febiger, 1972, 285-348.
- SMITH, K.U. & H. SUSSMAN: Cybernetic theory and analysis of motor learning and memory. In: E.A.BILODEAU (ed.): Principles of skill acquisition. New York usw.: Academic Press, 1969, 103-139.

- TAYLOR, F.V.: Psychology and the design of machines.
American Psychologist 1957, 12, 249-258.
- TROMBO, D. & F.MILONE: Primary task performance as a function of encoding, retention, and recall in a secondary task.
Journal of Experimental Psychology 1971, 91, 273-279.
- TRUMBO, D. & M. NOBLE: Response uncertainty in dual-task performance. Organizational Behavior and Human Performance 1972, 7, 203-215.
- TRUMBO, D., M.NOBLE & J.SWINK: Secondary task interference in the performance of tracking tasks. Journal of Experimental Psychology 1967, 73, 232-240.
- VINCE, M.A.: The intermittency of control movements and the psychological refractory period. British Journal of Psychology 1948, 38, 149-157.
- WAGNER, R.: Probleme und Beispiele biologischer Regelung.
Stuttgart: Thieme, 1954.
- WASSERMAN, H.N.: A unifying theoretical approach to motor learning. Psychological Review 1952, 59, 278-284.
- v. WEIZSÄCKER, V.: Der Gestaltkreis. Stuttgart: Thieme, 1950⁴.
- WELFORD, A.T.: The 'Psychological Refractory Period' and the timing of high-speed performance - a review and a theory.
British Journal of Psychology 1952, 43, 2-19.
- WELFORD, A.T.: The measurement of sensory-motor performance: Survey and reappraisal of twelve years' progress.
Ergonomics 1960, 3, 189-230.
- WELFORD, A.T.: Single-channel operation in the brain. Acta Psychologica 1967, 27, 5-22.
- WELFORD, A.T.: Fundamentals of skill. London: Methuen, 1968.
- WELFORD, A.T.: Skilled performance: Perceptual and motor skills. Glenview, Ill.: Scott, Foresman, 1976.
- WIENER, N.: Cybernetics. New York usw.: Wiley, 1948.
- WOODWORTH, R.S.: The accuracy of voluntary movement. Psychological Review Monograph Supplement 1899, 3, 54-59.
Auszugsweise abgedruckt in: D.LEGGE (ed.): Skills.
Harmondsworth: Penguin, 1970, 143-147.

LEBENS LAUF

17. März 1946	geboren als Sohn des Bundesbahnbeamten Heinrich Fingerhut und seiner Ehefrau Irma, geb. Schultheis.
1952	Einschulung in Biedenkopf/Lahn.
1956	Übergang auf die Lahntalschule Biedenkopf/Lahn (Gymnasium).
Dezember 1959	Umzug nach Marburg/Lahn. Besuch der Martin-Luther-Schule (Gymnasium für Jungen).
Februar 1966	Reifeprüfung.
ab April 1966	Studium der Psychologie an der Philipps-Universität Marburg/Lahn.
1968	Vordiplomprüfung.
Oktober 1971	Diplomprüfung.
Januar bis Juni 1972	Wissenschaftlicher Angestellter (Forschungsassistent) bei Prof. Dr. Graumann in Heidelberg.
Juli 1972 bis März 1976	Wissenschaftlicher Angestellter (Forschungsassistent) bei Prof. Dr. Merz in Marburg/Lahn.
seit April 1976	Wissenschaftlicher Angestellter am Psychologischen Institut der Universität Tübingen.

